



EESTI MAAÜLIKOOL
Metsandus- ja maaehitusinstituut

Kärt Metsoja

**FOTOKAAMERATE JA TARKVARADE VÕRDLUS
LÄHIFOTOGRAMM-MEETRILISTE 3D MUDELITE
LOOMISEL**

MAKING 3D MODELS USING CLOSE-RANGE
PHOTOGRAMMETRY:
COMPARISON OF CAMERAS AND SOFTWARE

Bakalaureusetöö
Geodeesia ja maakorralduse õppekava

Juhendaja: dotsent Natalja Liba, *PhD*
Kaasjuhendaja: Ragnar Saage, *MA*

Tartu 2018

Eesti Maaülikool Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Bakalaureusetöö lühikokkuvõte	
Autor: Kärt Metsoja		Õppekava: Geodeesia ja maakorraldus	
Pealkiri: Fotokaamerate ja tarkvarade võrdlus lähifotogramm-meetriliste 3D mudelite loomisel			
Lehekülgi: 66	Jooniseid: 18	Tabeleid: 4	Lisasid: 7
<p>Osakond: Geomaatika</p> <p>ETIS-e teadusvaldkond: 4. Loodusteadused ja tehnika (geodeesia)</p> <p>CERCS-i kood: P515 Geodeesia</p> <p>Juhendajad: Natalja Liba, Ragnar Saage</p> <p>Kaitsmiskoht ja -aasta: Tartu 2018</p> <p>Käesolevas bakalaureusetöös käsitlen lähifotogramm-meetria kasutusvõimalusi arheoloogias.</p> <p>Uurimuse eesmärk oli selgitada, kuidas mõjutab 3D mudeli kvaliteeti tarkvara ja kaamera valik. Võrdlesin kolme tarkvara: 1) Pix4D; 2) Agisoft Photoscan ja 3) Visual SFM koos tiheda punktipilve loomise mooduliga Yasutaka Furukawa's CMVS tool. Erineva hinnaklassi ja tehniliste näitajatega kaameraid oli võrdluses neli 1) Canon EOS 760D; 2) Canon EOS 600D; 3) Canon Ixus 185 ja 4) Sony Xperia Z1 nutitelefoniga kaamera.</p> <p>Tegin kõikide kaameratega täpselt samadest pildistamise asukohtadest fotod kahel erineval pildistamissessioonil (kokku 8 komplekti fotosid). Fotodest erinevate tarkvarade abil loodud esmaste 3D mudelite ehk tihedate punktipilvede välimuse võrdlemisel andis parima tulemuse Agisoft Photoscan: vaid see programm moodustas kõikide kaameratega tehtud piltidest hea katvusega tihedad punktipilved.</p> <p>Mudelite geomeetrilist kvaliteeti uurisin programmis Agisoft Photoscan tehtud mudelite puhul. Hüpoteesiks oli, et digitaalsed peegelkaamerad tagavad geomeetriselt täpsema tulemuse kui kompaktkamerad. Tulemused olid üllatavad. Esimese pildistamiskorra fotodest saadi suurima geomeetrilise veaga mudel kaameraga Canon EOS 760 D pildistatud fotodest (mudeli viga 5,0 mm) ja täpsem mudel kompaktkamera Canon Ixus 185 abil (viga 3,4 mm). Teise pildistuskorra mudelite vead olid oluliselt suuremad kui esimese pildistuskorra omad. Suurim viga oli 17,9 mm (Sony Xperia Z1) ja vähim 11,2 mm (Canon EOS 600D). Tulemuste põhjendamine on raske, kuna Agisoft Photoscan on suletud koodiga kommertstarkvara.</p>			

Antud töös hindasin mudeli geomeetrilist täpsust vaid 16–23 tahhümeetriliselt mõõdistatud kontrollpunkti suhtes. Kuna arheoloogia seisukohast on oluline uuritava objekti kuju võimalikult täpne edasiandmine, võiks edaspidi võrrelda fotogramm-meetriaprogrammi poolt loodud tihedat punktipilve terrestilise laserskanneerimise abil saadud referentsandmestikuga.

Märksõnad: lähifotogramm-meetria, 3D modelleerimine, tihe punktipilv, Agisoft Photoscan

Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Abstract of Bachelor's Thesis	
Author: Kärt Metsoja		Curriculum: Land Surveying and Land Management	
Title: Making 3D Models Using Close-range Photogrammetry: Comparison of Cameras and Software			
Pages: 66	Figures: 18	Tables: 4	Appendixes: 7
<div>Department: Geomatics</div> <div>Field of research: 4. Natural Sciences and Engineering;</div> <div>(CERC S) code: P515 Geodesy</div> <div>Supervisors: Natalja Liba, Ragnar Saage</div> <div>Place and date: Tartu 2018</div>			
<p>In current bachelor theses I observe the use of close-range photogrammetry based on photos taken by consumer cameras in the field of archaeology.</p> <p>Aim of the study is to unveil how the choice of software and cameras influences the quality of 3D models. I compared three different softwares: (1) Pix4D (2) agisoft Phtoscan, and (3) Visual SFM with dense cloud module Yasutaka Furukawa's CMVS tool and four different cameras (1) Canon EOS 760D, (2) Canon EOS 600D; (3) Canon Ixus 185, and (4) Sony Xperia Z1 smartphone camera D5503. Cameras represent different price segments and technical parameters.</p> <p>I took the photos with all the cameras from identical positions during two photo sessions (obtaining altogether 8 sets of photos). Comparison of primary 3D models, dense point clouds revealed that in terms of visual appeal, results were the best with Agisoft Phtoscan which was the only software that managed to create visually appealing dense point cloud from photos taken with smartphone camera.</p> <p>Geometric quality of models was further investigated using Agisoft Phtoscan software. My hypothesis was that digital single-lens reflex cameras will perform better in terms of model accuracy. The results were surprising. In case of first photo session, Canon EOS 760D images delivered a model with largest total error (5.9 mm) and model made of photos taken with Canon Ixus 185 was the most accurate (total error of the model 3.4</p>			

mm). Total errors of the models built from images of the second photo session were significantly larger. Worst result was obtained using Sony Xperia Z1 camera (total error 17.9 mm), Canon EOS 600D performed best (total error of the model 11.2 mm) It is hard to interpret the results as Agisoft Photoscan is a commercial software with closed source code (so-called “black-box” programme).

In current research I calculated model accuracy in reference to 19–23 check points measured with total station. In archaeology, it is important to document the exact volumes of structures and artefacts, therefore in the future dense 3D point clouds should be compared to reference data obtained with terrestrial laser scanner.

Keywords: close-range photogrammetry, 3D modelling, dense point cloud, Agisoft Photoscan

SISUKORD

SISSEJUHATUS	8
1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE.....	11
1.1. Maapealne ja lähifotogramm-meetria	11
1.2. Liikuva kaamera meetod.....	12
1.3. Fotogramm-meetria kasutamine arheoloogias	13
1.4. Lähifotogramm-meetria abil tehtud mudelite kvaliteedi hindamine	16
2. MATERJAL JA METOODIKA.....	19
2.1. Uurimistöö objekt ja kasutatud vahendid	19
2.2. Metoodika	24
2.3. Välitööd	25
2.3.1. Objekti ettevalmistus	25
2.3.2. Markeerimistähiste mõõtmine	26
2.3.3. Pildistamine	27
2.4. Andmetöötlus.....	30
2.4.1. Hõredate ja tihedate punktipilvede loomine ja võrdlus	30
2.4.3. Agisoft Photoscani abil loodud mudelite georefereerimine ja nende täpsuse võrdlemine	31
3. TULEMUSED JA ARUTELU	37
3.1. Tarkvara ja kaamera valiku mõju: mudeli kvaliteedi visuaalne hindamine ja punktipilvede tiheduse võrdlemine.....	37
3.2. Tarkvara Agisoft Photoscan abil loodud mudelite geomeetrilise kvaliteedi hindamine	39
KOKKUVÕTE	44
KASUTATUD ALLIKAD JA KIRJANDUS	46
LISAD.....	50
Lisa 1. Telefoniga pildistatud fotodest tehtud tihedate punktipilvede võrdlus.....	51
Lisa 2. Kaameraga Canon Ixus 185 pildistatud fotodest tehtud tihedate punktipilvede võrdlus	52
Lisa 3. Kaameraga Canon EOS 600D pildistatud fotodest tehtud tihedate punktipilvede võrdlus	53

Lisa 4. Kaameraga Canon EOS 760D pildistatud fotodest tehtud tihedate punktipilvede võrdlus	54
Lisa 5. Tahhümeetriselt mõõdistatud markeerimispunktide koordinaadid esimesel ja teisel pildistuskorral	55
27.04.2018 mõõdistatud markeerimispunktid	55
08.05.2018 mõõdistatud markeerimispunktid	56
Lisa 6. Mudelite kontrollpunktide vigade arvutused	57
27.04.2018 Canon EOS 760 4 sidepunkti- ja 16 kontrollpunktiga mudeli vead	57
27.04.2018 Canon EOS 600 4 sidepunkti- ja 16 kontrollpunktiga mudeli vead	58
27.04.2018 Canon Ixus 185 4 sidepunkti- ja 16 kontrollpunktiga mudeli vead	59
27.04.2018 Sony Xperia Z1 4 sidepunkti- ja 16 kontrollpunktiga mudeli vead	60
08.05.2018 Canon EOS 760 D 7 sidepunkti- ja 16 kontrollpunktiga mudeli vead	61
08.05.2018 Canon EOS 600D 7 sidepunkti- ja 19 kontrollpunktiga mudeli vead	62
08.05.2018 Canon Ixus 185 7 sidepunkti- ja 16 kontrollpunktiga mudeli vead	63
08.05.2018 Sony Xperia Z1 7 sidepunkti- ja 16 kontrollpunktiga mudeli vead	64
Lisa 7. Tekstuuriga 3D mudelite näiteid	65

SISSEJUHATUS

Viimastel aastakümnetel on fotogramm-meetria, mis kunagi oli vaid koolitatud spetsialistide pärusmaa, muutunud tavakasutajatelegi järjest kättesaadavamaks ja selle kasutamine on nii teaduslikel kui ka kommertseesmärkidel plahvatuslikult kasvanud. Tavalise fotokaameraga ja allveekaameraga tehtud piltide, droonifotode või isegi videomaterjali töötlemiseks on loodud lugematu hulk tarkvara, nende hulgas vabavaralised lahendused ja tasuta veebirakendused. Eelnevat väidet illustreerib tõik, et Wikipedia fotogramm-meetria tarkvarade võrdlustabelist leiab üle 100 erineva tarkvara (Wikipedia 2018 *s v* comparison of photogrammetry software). Lihtsamaid fotogramm-meetrilisi mudeleid on võimalik teha lausa nutitelefonis.

Fotogramm-meetriliste toodete kasutusvaldkond on pea piiramatult ulatudes insenerialadest humanitaariasse või meditsiini (Liba 2005: 39). Minu esmakokkupuude fotogramm-meetriliste mudelite maailmaga leidis aset arheoloogiaõpingute raames ja käesolevas lõputöös võtangi vaatluse alla fotogramm-meetria kasutusvõimalused peamiselt arheoloogias. Arheoloogide jaoks on fotogramm-meetria asendamatu tööriist seetõttu, et võimaldab kiiresti ja odavalt dokumenteerida erinevaid struktuure ja kaevamise eri etappe. Arheoloogilise informatsiooni saamiseks uurimise käigus muistis ju sageli hävitatakse. Varasem praktika nägi ette kõikide kaevamisetappide mõõdistamise ja joonestamise ning fotografeerimise, mis võis võtta mitmeid tunde. Fotogramm-meetria võimaldab aega oluliselt kokku hoides saada täpsemaid tulemusi (vt nt De Reu jt 2012).

Arheoloogid võivad fotogramm-meetria abil koostada kaevandi plaane, dokumenteerida erinevaid struktuure või uurida ja dokumenteerida esemeid. Eesti arheoloogias droonifotogramm-meetria senini levinud pole, seetõttu on käesoleva töö fookuses fotokaameraga tehtav maapealne lähifotogramm-meetria. Esmalt uurin erinevate kaameratega pildistatud fotodest eri tarkvarade abil tehtud mudelite väljanägemist ehk hindan nende kvaliteeti visuaalselt. Teada on, et kõikide pindade modelleerimisega ei saa fotogramm-meetria tarkvarad ühtviisi hästi hakkama, probleeme valmistavad läikivad või liiga ühtlased pinnad, ka

taimestikuga kaetud pinnad (Agisoft Photoscan... 2018: 8, Kangur 2016, Niederheiser jt 2016). Töö eesmärk on välja selgitada, kui palju mõjutab mudeli väljanägemist valitud tarkvara ja kaameraliik. Selleks võrdlen kolme erineva tarkvara abil nelja erineva kaameraga pildistatud fotodest tehtud tihedaid punktipilvi. Tihedate punktipilvede puhul on hästi näha, missugused alad on punktidega hästi kaetud ja missuguste alade modelleerimine on halvemini õnnestunud.

Võrdlusesse valisin kaks levinumat kommerts- ja ühe vabavaralise tarkvara: Agisoft Photoscan Professional 1.4.1, Pix4D Mapper 4.2.27 ja vabavaraline Visual SFM. Pildistamiseks kasutasin nelja erineva hinnaklassi ja tehniliste näitajatega tavakasutajatele mõeldud digitaalkaamerat: nutitelefoni Sony Experia Z1 kaamerat, kompaktkamerat Canon Ixus 185 ja kahte peegelkaamerat (Canon EOS 600D ja Canon EOS 760D).

Lisaks mudelite kvaliteedi visuaalsele hindamisele uurin, kas ja kuidas mõjutab kaamera valik fotogramm-meetrilise mudeli geomeetrilist kvaliteeti. Selleks võrdlen nelja erineva kaameraga pildistatud fotodest ühe ja sama tarkvara abil tehtud mudeleid. Uurimishüpoteesiks on, et kaamera valik mõjutab mudelite geomeetrilist kvaliteeti: digitaalse peegelkaamerafotodest tehtud mudel võiks olla geomeetriliselt täpsem kui telefoni kaameraga pildistatud fotodest tehtud mudel. Usutavasti on aga ka telefonifotodest tehtud mudel arheoloogilise dokumenteerimise tarbeks piisvalt täpne.

Mudelite geomeetrilist täpsust vaadeldakse põhjalikumalt Agisoft Photoscani tarkvara puhul kahel põhjusel: punktipilvede vaatlusel selgus, et just see tarkvara saab kõikide kasutatud kaameratega tehtud fotodest fotoplokkide moodustamise (edaspidi joondamise, *Align Photos*-käsklus tarkvara tööprotsessis) ja erinevate pindade modelleerimisega kõige paremini hakkama ning seda tarkvara kasutatakse Tartu Ülikooli arheoloogia osakonnas arheoloogilisel dokumenteerimisel. Kirjanduse ülevaate peatükis on näidatud, et selle tarkvara kasutamine on suhteliselt levinud erinevate maade ülikoolide arheoloogiaosakondades.

Agisoft Photoscani kodulehel lubatakse lähifotogramm-meetria puhul mudeleid täpsusega ± 1 mm ja droonifotode puhul täpsust ± 3 cm. Ideaalilähedastes tingimustes on selline täpsus küllap saavutatav¹, minu eksperiment keskendub aga suhteliselt realistlikule situatsioonile:

¹ Iseküsimus on, mida sellise täpsushinnanguga silmas peetakse, sellel siinkohal pikemalt ei peatuta.

modelleerimiseks on valitud kultuurimälestis, mis asub maastikul ja seda on pildistatud loomuliku valgusega. Mudeli tegemiseks valiti suhteliselt väikse objekti (Kärkna kloostri varemete umbes 15 meetri pikkune müürifragment) üks pind, et võimalikud mõõdistamisvead ja halvasti valitud pildistamisteed ei mõjutaks omalt poolt mudeli täpsust.

Käesoleva uurimuse põhiosa on jaotatud kolmeks peatükiks. Esimene peatükk annab ülevaate senisest uurimisloost. Kuna valisin fotogramm-meetriliseks dokumenteerimiseks arheoloogilise objekti, keskendub kirjanduse ülevaade arheoloogiaga seotud töödele – fotogramm-meetria valdkond on lihtsalt nii lai, et kõigest on võimatu ammendavat ülevaadet anda. Teises peatükis tutvustatakse uurimistöö objekti ja vahendeid ning antakse ülevaate töö metoodikast nii välitööde kui andmetöötluse osas. Viimases, tulemuste ja arutelu peatükis esitletakse uurimistöö tulemusi.

1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE

1.1. Maapealne ja lähifotogramm-meetria

Fotogramm-meetria on meetod objekti kuju, mõõtmete ja asendi määramiseks fotode järgi. Matemaatiliselt täpsete mõõtmete ja 3D andmestiku saamiseks kasutatakse vähemalt kahte fotot, millel on omavaheline ülekattuvus. Põhjaliku eestikeelse ülevaate fotogramm-meetria olemusest, arengust ning ajaloost leiab Natalja Liba 2005. aastal ilmunud õpikust „Fotogramm-meetria alused”. Klassikaliseks inglisekeelseks ülevaateoseks on Paul Wolf'i „Elements of Photogrammetry” (esmatrükk 1974, viimane täiendatud versioon „Elements of Photogrammetry with Applications in GIS” (Wolf jt 2014)).

Fotogramm-meetria jaotub sateliitfotogramm-meetriaks, aerofotogramm-meetriaks ja maapealseks fotogramm-meetriaks (Liba 2005: 20). Viimaste aastakümnete arengud on tinginud vajaduse käsitleda eraldi lähifotogramm-meetria. Wolf jt (2014) määratlevad lähifotogramm-meetria maapealse fotogramm-meetria, mille pildistus on tehtud lähemalt kui 300 meetrit. Mõned uurijad toonitavad, et droonifotogramm-meetrialgi on lähifotogramm-meetria enam ühist kui klassikalise aerofotogramm-meetria. Määravaks on pildistamise distants, kaamera asendi stabiilsuse, piltide ülekate ja pildistamise kauguse varieeruvus (Remondino jt 2011: 26). Harv ei ole ka droonipildistuse ja maapealse pildistuse kombineerimine ühe ja sama objekti uurimisel (nt Fugazza jt 2018, El-Omari, Moselhi 2008).

Lähifotogramm-meetria teemal on ilmunud arvukalt üldkäsitlusi. Kaks ülevaateost, 1996. aastal esmakordselt ilmunud „Close Range Photogrammetry and Machine Vision” (Atkinson 2001) ja „Non-Topographic Photogrammetry” (Karara 1989) on selles vallas siiani laialt kasutatavad. 2006. aastal esmakordselt inglisekeelsena ilmunud põhjalik õpik „Close Range Photogrammetry” (saksakeelne originaal „Nachbereichsphotogrammetrie” aastast 2000) defineerib lähi-fotogramm-meetria universaalse 3D mõõtetehnikana, mida kasutatakse

interdistsiplinaarselt. Võrreldes aerofotogramm-meetriaga või satelliitfotogramm-meetriaga on pildistamiskaugus oluliselt lühem, mõnest sentimeetrist mõnesaja meetrini. Esemed, mida sellisel meetodil uuritakse ja dokumenteeritakse, on samuti väiksemad, ulatudes poolest meetrist mõnesaja meetrini ja mõõtetäpsus on väga suur, mõnede insenerirakenduste korral on mõõtemääramatus lausa $\pm 0,1$ mm (Luhmann jt 2013: 5–27). Luhmann jt (samas) väidavad, et väiksemat täpsust nõudvates kasutusvaldkondades on mõõtemääramatus ± 1 cm, paljude arheoloogiliste objektide jaoks piisaks sageli veel vähemastki. Teinekord uurivad arheoloogid aga fotogramm-meetriliselt esemeid, mille suurus on alla 10 cm ja seejuures on ootused täpsusele mõistagi hoopis kõrgemad (nt Saage, Wärmländer 2018: 37, Kersten, Lindstaedt 2012: 4).

1.2. Liikuva kaamera meetod

Käesolevas töös ei peatuta pikemalt fotogramm-meetria tehnilistel aspektidel – optikal, perspektiiviõpetusel jne, ülalmainitud õppekirjandusest leiab huviline kõik vajaliku. Üks oluline tehnoloogiline aspekt vajab siiski selgitamist – laiatarbe lähifotogramm-meetrias kasutatakse meetodit, kus uuritavate objektide struktuur tuletatakse kaamera liikumisest (inglise keeles *Structure from Motion*, edaspidi lühendatult SfM). Meetodi ajaloost ja olemusest annavad ülevaate Westoby jt (2012). SfM-meetod arendati välja 1990ndatel aastatel, see on seotud arvutinägemise (*computer vision*) teadusharuga. Meetodi sünni eelduseks on 1980ndatel arendatud algoritmid kujutise automaatseks tuvastamiseks. SfM-meetodi aluspõhimõte on sama, mis traditsioonilisel stereofotogramm-meetrial – 3D struktuure saab tuletada seeriast ülekatttega piltidest. Siiski erineb see konventsionaalsest fotogramm-meetrist selle poolest, et uuritava objekti geomeetria, kaamera positsioonid ja orientatsioonid arvutatakse automaatselt. Eelnevalt markeeritud ja teadaolevate koordinaatidega punktid pole selleks vajalikud. Fotogramm-meetria programm tuvastab erinevatelt fotodelt iseloomulikud punktid ja, kasutades erilist kiirtekimbu sobitamise (*bundle adjustment*) tehnoloogiat, arvutab välja kaamera asukoha. Kiirtekimbu sobitamine toimub vähimruutude meetodil. SfM meetodiga luuakse 3D mudelid alguses suhtelisse ruumi, kus mudelil puuduvad nii mõõtkava kui ka

orientatsioon (Westoby jt 2012: 301–302). Reealmaailmaga seotakse mudeli suhteline ruum mõõdistatud tugipunktide abil.

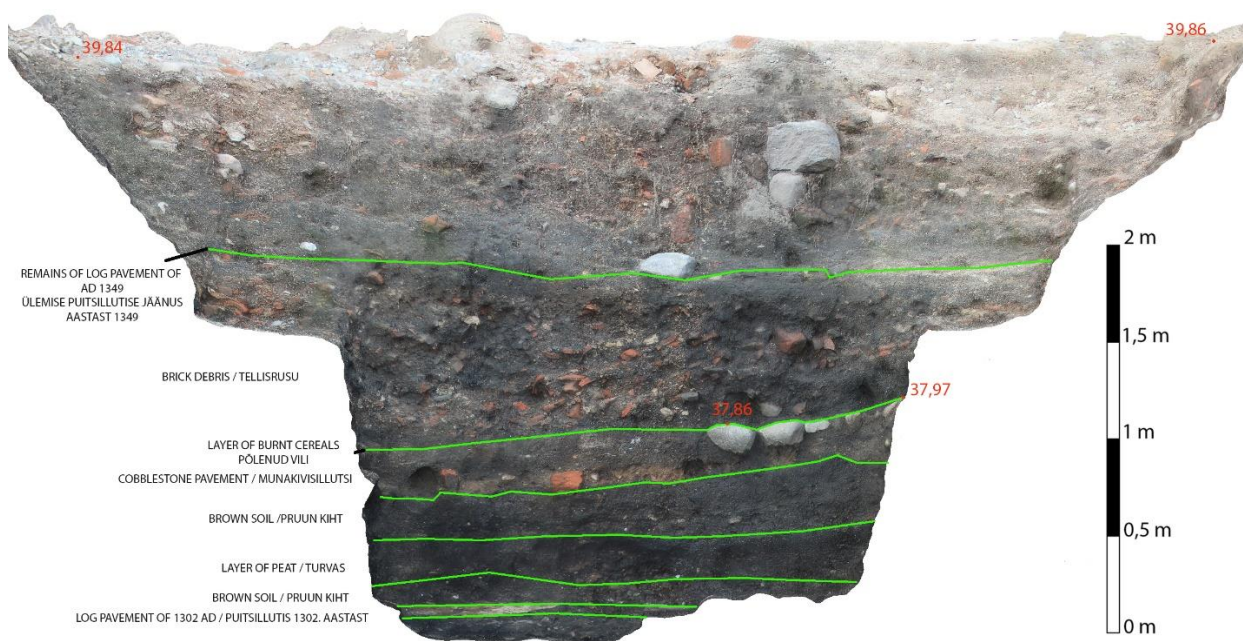
Iseloomulikud punktid leiab fotodelt programm ise, arvutab nendele tunnusvektorid, mille alusel ta fotod omavahel kokku paneb ehk joondab ja leiab kaameratele ja punktidele asukoha ruumis. Ühtlasi arvutab programm kaamera orienteerimise ja kalibreerimise parameetrid (Sepp jt 2016: 51). Kaamera varasem kalibreerimine pole oluline, SfM-meetodil on võimalik 3D kujutisi luua suvalistest piltidest (nt vanad paberfotod, erinevate kasutajate poolt internetti üles laetud pildid jne). Enamik programme kasutab kalibreerimisel abivaheninda siiski digitaalsete fotodega kaasas olevaid metaandmeid (EXIF-data).

1.3. Fotogramm-meetria kasutamine arheoloogias

Veel 2003. aastal leidis Stuart Jeffrey (2003, 107 jj) oma Glasgow ülikoolis kaitstud doktori-väitekirjas Šoti varakeskaegsete raidkivide 3D modelleerimisest, et arheoloogiliste huviväärsuste dokumenteerimiseks on fotogramm-meetria meetodina väga ajamahukas ja ei võimalda tihti saavutada piisavat detailsust. Praeguseks on olukord täielikult muutnud – fotogramm-meetriat peetakse üheks kiiremaks, lihtsamaks ja odavamaks dokumenteerimismeetodiks arheoloogide jaoks (nt McCarthy 2014: 75, Schöning, Heidemann 2015: 451, Kersten, Lindstaedt 2012: 9). Erinevalt geodeesias kasutatavatest 3D modelleerimise meetoditest (terrestriline laserskaneerimine, LIDARsüsteemid), mille seadmed on kallid ja nõuavad eriväljaõppega spetsialiste nii välitöö teostamiseks kui järeltöötamiseks, on maapealsest lähifotogramm-meetriast kujunenud arheoloogide jaoks rutiinne tööriist (Schöning, Heidemann 2015: 451).

Lisaks sellele, et lähifotogramm-meetria on võrreldes laserskaneerimisega odav ja lihtne, on tal arheoloogias rakendamiseks üks oluline eelis. Erinevalt laserskannerist omistakse fotogramm-meetrilise punkt pilve punktidele ka värv, sest need on tehtud värvifotodest (McCarthy 2014: 177). Laserskanneri pildisensorid ei ole kaugeltki nii võimekad kui peegelkaamera omad ja kui

uurijat huvitavad ennekõike kujutatava objekti tekstuur ja värv, on see määrava tähtsusega (vt nt Pagi, Kimber 2017). Fotogramm-meetria abil on võimalik koostada arheoloogilisi profiiljooniseid (Tvauri jt 2017, joonis 1), laserskanneri kasutamine sellise töö jaoks poleks otstarbekas ega annaks ka võrreldavat tulemust. Mõnikord on fotogramm-meetria eeliseks ka ligipääsetavus – teatud kohtades võib laserskanneriga mõõtmine olla ülimalt keeruline (nt kujude tipud vms), samas kui pildistamisel (vajadusel pulkstatiiviga) komplikatsioone pole (Kersten, Lindstaedt 2012: 6; Pagi, Kimber 2017).



Joonis 1. Näide fotogramm-meetria abil koostatud profiiljoonisest (Tvauri jt 2017).

Fotogramm-meetria kasutusvõimaluste kohta kultuuripärandi uurimisel ja arheoloogias on ilmunud arvukalt teadusartikleid. Lisaks fotogramm-meetria kui meetodi ja selle kasutusvõimaluste tutvustamisele (nt De Reu jt 2012, McCarthy 2014, El-Omari ja Moselhi 2008) on publitseeritud terve rida juhtumi-uuringuid. Fotogramm-meetria abil on uuritud näiteks altarimaale (Soto-Martín 2013), Lihavõtteasaarelt pärit kivikuju Briti Muuseumis (Miles jt 2014), paleoliitilisi koopaid (Lerma jt 2010) jne. Miles jt näitavad Lihavõtteasaare kuju uurimist käsitlevas artiklis, kuidas pildistamise baseeruvad meetodid – lähifotogramm-meetria ja peegeldava külvalgusega saripildistamine – andsid võimaluse kuju analüüsida viisil, mida

palja silmaga vaatlemine ei võimaldaks ja tänu sellele meetodile saadi uut infot kuju kaunistavate raiendite, nende loomise järjekorra ja valmistustehnoloogiate kohta (Miles jt 2014: 601–604).

21. sajandi teisel kümnendil on maailma ülikoolide arheoloogiaosakondades kaitstud arvukalt bakalaureuse- ja magistritöid fotogramm-meetria kasutamise teemavaldkonnas. Enamikel juhtudel on vaadeldud Agisoft Photoscani tarkvara abil loodud 3D mudeleid ja muid fotogramm-meetrilisi tooteid. Nendega töödega tutvumine võib algajale lähifotogramm-meetria huvilisele kasulikuks osutuda, sest võrreldes teaduslike artiklitega on magistritöö maht palju suurem ja metodoloogia põhjalikumalt lahti kirjutatud.

Erik Kjellman võrdles oma 2012. aastal Tromsø ülikoolis kaitstud magistritöös fotogramm-meetrilist dokumenteerimist ja tavamöödistamist tahhümeetriga, mis on Norra arheoloogias valitsev. Ta jõudis järeldusele, et fotogramm-meetria kiirema ja odavama meetodina vääriks palju rohkem kasutamist. Kuigi Kjellmani töös anti ülevaade erinevatest tarkvaralistest lahendustest, on näidisuuringud pronksi- ja kiviaegsetel muististel läbi viidud Agisoft Photoscani tarkvara kasutades.

2014. aastal Lääne-Ontario ülikoolis kaitstud magistritöö annab ülevaate 3D mudelite tegemisest programmidega 123D Catch ja Agisoft Photoscan. Töö autor Colleen Haukaas leiab, et selliste kasutajasõbralike ja täisautomatiseeritud programmide kasutamine võimaldab, lisaks arheoloogide töö lihtsustamisele, kohalikku kogukonda hästi kaasata. On üldtuntud tõsiasi, et kohaliku kogukonna kaasamine arheoloogilisse uurimisse tagab arheoloogiamälestiste kaitse paremini kui seadusandlikud vahendid.

Ka Tartu Ülikooli arheoloogia osakonnas on kaitstud mõned fotogramm-meetriaga seotud tööd. 2012. aastal omandas TÜ programmi Agisoft PhotoScan Professional Edition ja uue ning võimsa arvuti ning Ragnar Saage (2013). magistritöös esitati selle komplekti esimene teaduslik väljund – Käku sepikoja lähifotogramm-meetria abil koostatud plaanid ja nende tegemise protsessi kirjeldus. Edgar Laksa proseminaritöö anti detailne ülevaade fotogramm-meetria tööprotsessist alates pildistamise planeerimisest kuni lõpptoodete valmistamiseni tarkvara Agisoft Photoscan abil (Laksa 2014).

Eesti arheoloogias on lähifotogramm-meetria jõudsasti kanda kinnitanud. Viimaste aastate kogumikke „Arheoloogilised välitööd Eestis/Archaeological Fieldwork in Estonia” sirvides leiab arvukalt artikleid, kus uurimisobjekti esitletakse 3D mudelite või nende abil kokku pandud ortofotode abil (nt Saage jt 2015, Kivirüüt, Olli 2016, Laneman jt 2016). Pagi ja Kimberi (2017) aruandes Tallinna lennujaama territooriumil paikneva lohukivi dokumenteerimisest on võrreldud erinevaid meetodeid: laserskanneerimist, peegeldava külvalgusega saripilditamist (RTI e *Reflectance Transformation Imaging*) ning lähifotogramm-meetriat ja antud soovitus sarnaste objektide dokumenteerimisel kindlasti kaaluda fotogramm-meetrilist dokumenteerimist.

1.4. Lähifotogramm-meetria abil tehtud mudelite kvaliteedi hindamine

Lähifotogramm-meetriliste toodete kvaliteeti, täpsust ja seda mõjutavaid asjaolusid on uuritud üsna põhjalikult. Küllalt palju on seda tehtud ka arheoloogiateaduse raames. Kersten ja Lindstaedt (2012) annavad ülevaate odavatest pildistusel põhinevatest meetoditest, mille abil arheoloogilisi objekte dokumenteerida ja modelleerida. Nad võrdlevad näiteks ühe kuju laserskanneerimise abil saadud 3D mudelit fotogramm-meetriliste mudelitega ja näitavad, et erinevate tarkvarade abil tehtud fotogramm-meetriliste mudelite hälve võrreldes laserskanneerimise abil tehtuga jääb enamasti vahemikku $\pm 1,3$ mm kuni $\pm 1,6$ mm. Suurimad hälbed on aga peaaegu 20 cm ja need jäävad kuju ja maapinna üleminekuale – servaalade modelleerimine on fotogramm-meetria programme nõrk koht. Kuna aga laserskanneerimise ja fotogramm-meetrilise uurimise vaheline aeg oli küllalt pikk, ei välistanud autorid võimalust, et pinnas kuju jalami ümber oli deformeerunud ja vead seega liialdatud (Kersten, Lindstaedt 2012: 5–8).

Eestis on programmi Agisoft Photoscan abil tehtud mudelite täpsust uuritud droonifotogramm-meetria puhul. Sepp jt (2016) on uurinud Kuressaare linnusest ja selle ümbrusest droonipildistuse abil tehtud mudelite plaanilist ja kõrguslikku täpsust. 2016. aastal on Tartu Ülikooli geograafia osakonnas droonifotogramm-meetria täpsuse teemal kaitsnud ka üks bakalaureusetöö (Huul 2016). Huul kasutas samuti Agisoft Photoscani tarkvara. Samal aastal kaitses Martin Kangur Eesti Maaülikooli geomaatika osakonnas lõputöö “Fotokaameraga

tehtud fotode põhjal loodud 3D mudelite kvaliteeti mõjutavad faktorid”. Tema töö põhines tarkvaral Autodesk 123D Catch, mille arendamine lõpetati 2016. aastal ja mis ei ole alates 2017. aastast enam kasutajatele kättesaadav.

Kanguri töö keskendus sellele, kuidas tarkvara võimekus, pildistatava objekti omadused ja statiivi kasutamine või mittekasutamine mõjutavad mudelite kvaliteeti. Võimalikke mõjutegureid ja nende kombinatsioone on mõistagi rohkem. Eespoolmainitud Sepp jt (2016: 54–55) vaatlesid, kuidas mõjutab mudeli täpsust tugipunktide ja nende asukoha valik, aga uuritud on ka näiteks pildistamise kauguse mõju 3D punktipilve täpsusele (An 2017) või kaamera parameetrite ja valitud tarkvara mõju mudeli täpsusele (Niderheiser jt 2012).

Niderheiseri jt artiklis on analüüsitud suhteliselt suurt hulka erinevaid kaameraid ja tarkvarasid, aga mudelite geomeetriat võrreldi seal paraku vaid omavahel, referentsmõõtmisi tahhümeetri või laserskanneriga tehtud ei ole.

De Reu jt (2012) uurisid programmi Agisoft Photoscan abil tehtud fotogramm-meetriliste ja kõrgusmudelite täpsust võrrelduna tahhümeetrilise mõõdistusega erinevate arheoloogiliste objektide puhul. Keskmised ruutvead jäid, olenevalt objektist, 5 mm kuni 2 cm piiresse. Enamasti dokumenteeriti erinevaid ehituskonstruktioone ja struktuure – kaevud, keldrimüürid jne, kasutades digitaalset peegelkaamerat. Esitleti ka tavakasutajale mõeldud kompaktkameraga tehtud piltidest koostatud mudelit keskaegsest hobuseskeletist. See mudel kahjuks georefereeritud ei olnud ja mudeli täpsust ei hinnatud.

Remondino jt võrdlesid erinevate tarkvarade abil erinevate objektide (eri kuju, struktuur jne) modelleerimist. Autorid jõudsid järeldusele, et SfM meetod pole ei usaldusväärne ega korratav. Fotogramm-meetria seisukohast on see, et SfM algoritmid arvutavad igale pildile üksikult hulga sisemisi parameetreid, ebatavaline lähenemine ja see on kiirtekimbu sobitamise juures peamine vigade allikas. Autorid analüüsisid erinevate fotode puhul ja eri programmide poolt arvutatud piltide sisemisi parameetreid ja näitavad, et need on äärmiselt kõikuvad. Sellest hoolimata, kui kontrollida mudelite täpsust, lastes programmil arvutada koordinaadid kontrollpunktidele, on koordinaatide viga kõikidel juhtudel äärmiselt väike. Levinumate tarkvarade vahel pole mingit märgatavat vahet. Usutavasti kompenseerivad täpsed välised parameetrid (millest osad programm samuti arvutab) ebatäpsed sisemiste parameetrite hinnangud (Remondino jt 2012).

Kersten ja Lindstaedt (2012: 7) jõudsid erinevate tarkvarade geomeetrilist täpsust uurides järeldusele, et vabavaraliste tarkvarade Bundler ja Visual SFM puhul saavutatakse suurim geomeetriline täpsus, programmide 123 Catch ja Agisoft Photoscan tulemused selles vallas on märgatavalt halvemad.

2. MATERJAL JA METOODIKA

2.1. Uurimistöö objekt ja kasutatud vahendid

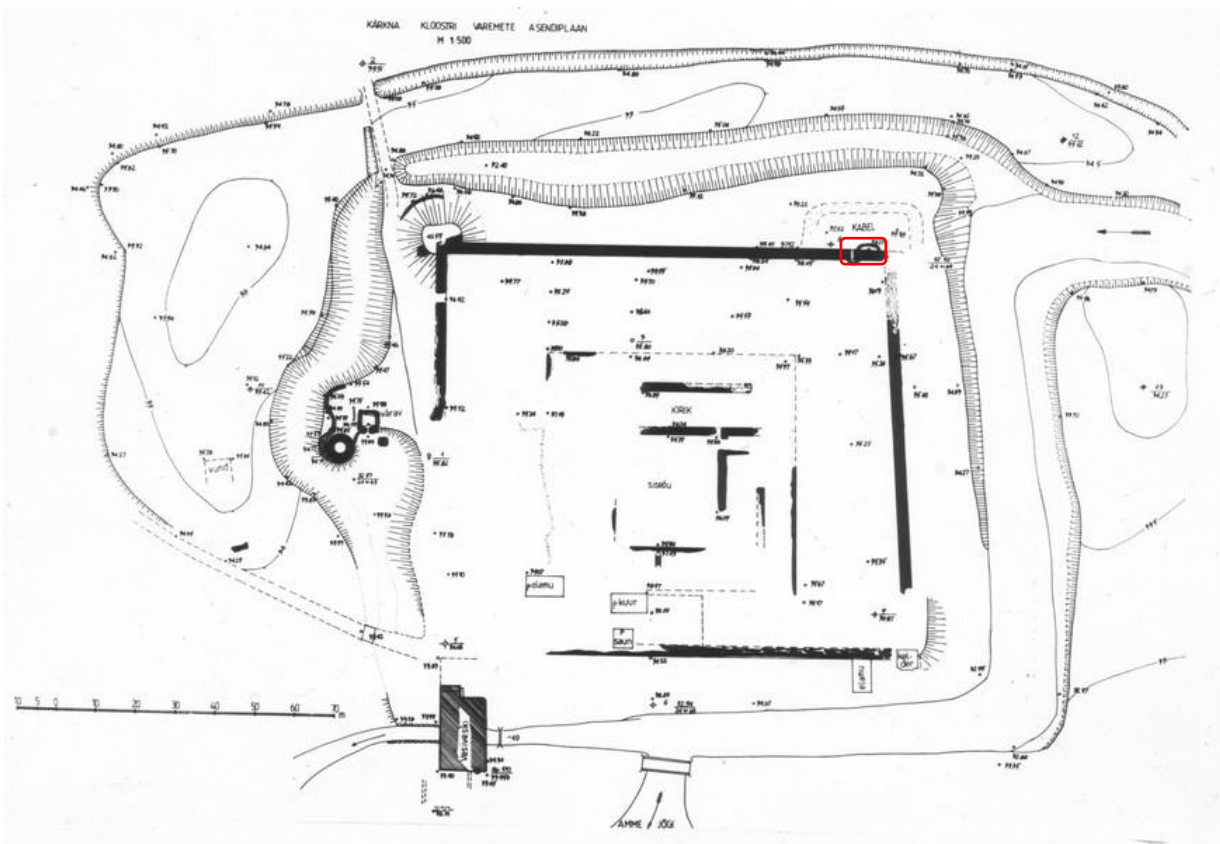
Uurimistöö objektiks olid lähifotogramm-meetrilised 3D mudelid, mis on tehtud välipildistamisel saadud fotodest. Pildistamiseks valiti Kärkna kloostri varemete müürilõik. Kärkna ehk Valkena (saksa k *Falkenau*) tsistertslaste mungakloostri varemed paiknevad Tartu lähedal Lammiku küla alal (joonis 2).



Joonis 2. Kärkna kloostrikompleksi varemete asukoht Amme jõe kaldal on kultuurimälestiste kaardikihil tähistatud sinisega. Kaart: Maa-amet 2018

Klooster asutati 1228. või 1233. aastal. Järgnevatel sajanditel mitmes etapis valminud kloostrirajatised rüüstasid Moskva Tsaaririigi väed Liivi sõja alguses 1558. aastal (Alttoa 1999). Kloostri varemeid kasutati hiljem kivimurruna. Tänapäevaks on säilinud müürid peaaegu täielikult mattunud varinguruse alla. Käesolevas bakalaureusetöös dokumenteeritud müürilõik on osa kloostri konvendihoonet ümbritsenud kastelli põhjamüürist (joonis 3). Ühtlasi oli see müüriosa kastelli kirdenurga välisküljel olnud kabeli lõunaseinaks. Dokumenteeritud müürilõik

kaevati rusust välja 1999. aastal Tartu vallavalitsuse tellimusel (Tvauri 1999). Sama müürilõigu põhjakülg oli juba varem lahti kaevatud. Võimalik, et siin oli 1888. aastal Reinhold Guleke juhendamisel tehtud väljakaevamiste kaevand (vt Hasselblatt 1889). Algne kavatsus kloostri territooriumil konserveerimis- ja rekonstrueerimistöid teostada ei ole realiseerunud ning see müür ühes teiste maapinnal näha olevatega on jäetud ilmastiku meelevalda ning lagunema. Lähifotogramm-meetriline 3D mudel aitab hinnata lagunemise kiirust ja ulatust.



Joonis 3. Uuritud müürilõik on Kärkna kloostri varemete asendiplaanil märgitud punasega (Kultuurimälestiste riiklik register 2018).

Kuna töö eesmärk oli välja selgitada, kuidas mõjutab pildistamiseks kasutatava kaamera valik mudeli geomeetrilist kvaliteeti, kasutati nelja erineva hinnaklassi ja erinevate parameetritega (tabel 1) digitaalkaameraid:

1. Peegelkaamera Canon EOS 600D
2. Peegelkaamera Canon EOS 760D
3. Kompaktkaamera Canon Ixsus 185
4. Nutitelefon Sony Xperia Z1 kompaktkaamera.

Tabel 1. Kaamerate parameetrid

Kaamera, mudel	Lahutusvõime (pikslit)	Objektiivi fookuskaugus (mm)	Sensori suurus (mm)
Canon EOS 760D	6000 × 4000	18 (– 55)	22,3 × 14,9
Cabon EOS 600D	5185 × 3456	18 (– 55)	22,3 × 14,9
Canon Ixsus 185	5152 × 3864	5 (– 40)	6,17 × 4,55
Sony Xperia Z1 kaamera D5503	5248 × 3936	5	6,17 × 4,55

Suumobjektiivide puhul suumi ei kasutatud, seetõttu on vastavad väärtused tabelis toodud sulgudes. Peegelkaamerad võimaldavad kaamera seadeid käsitsi vabalt muuta ja sel moel pildikvaliteeti kontrollida, kompaktkaamerad on täielikult automatiseeritud. Canon EOS 760D ja Canon EOS 600D kaameratel kasutati ühte ja sama standardobjektiivi.

Fotoobjektiivi kasutusvõimalusi määravad omadused on fotoobjektiivi fookuskaugus, objektiivi valgusjõud ehk suhteline ava, kujutise välja nurk, tervassügavus ja lahutusvõime (Liba 2005: 87). Tabelis 1 on toodud lahutusvõime ja fookuskauguse näitajad, kuna neid minu eksperimendis pildistamisel ei muudetud, teised väärtused valiti vastavalt valgusoludele pildistamise ajal. Peegelkaamera puhul tehti seda käsitsi, kompaktkaamerate puhul tegi valikud kaamerate automaatika. Kaamerad valiti kättesaadavuse alusel. Võrdluse lisati kaks sarnaste omadustega peegelkaamerat ja kaks sarnaste omadustega kompaktkaamerat, mõlemal juhul oli peamine erinevus lahutusvõimes.

Loodud mudelite georefereerimiseks kasutati sidepunkte ja täpsuse hindamiseks kontrollpunkte, mis mõõdistati tahhümeetriselt, kasutades elektrontahhümeetrit Trimble S5. Tahhümeetri orienteerimiseks vabas seisupunkti meetodil mõõdistati kindelpunktid GNSS seadmega Trimble R4-3. Mõlemad instrumendid kuuluvad Eesti Maaülikoolile.

Tihedate punktipilvede loomiseks kasutati kolme erinevat tarkvara:

1. Agisoft Photoscan Professional 1.4.1
2. Pix4D Mapper 4.2.27
3. Visual SFM koos tiheda punktipilve loomise mooduliga Yasutaka Furukawa's CMVS tool.

Vabavaraline tarkvara on mõistagi tasuta, teised vaatlusalused tarkvarad on hinna poolest suheliselt kättesaadavad. Agisoft Photoscan Professional Edition litsents maksab alla 3000 euro, õppeotstarbeline litsents u 450 eurot (Agisoft) ja Pix4D täisfunktsionaalsusega püsilitsents 6500 eurot, viimase tarkvara puhul võib soetada ka perioodilisi litsentse või teatud kindla funktsionaalsusega toote (nt põllumajanduslikuks kasutuseks vms) litsentse (Pix4D).

Vaatlusalustest tarkvaradest sai vaid Agisoft Photoscan rahuldavalt hakkama telefoni kaameraga tehtud piltidest tiheda punktipilve loomisega (vt allpool, lk 22 jj), seetõttu kasutati edasises võrdluses vaid seda tarkvara.

Antud töös kasutati esmaste tihedate punktipilvede loomiseks kommertstarkvarade tasuta 30-päevaseid prooviversioone ja sülearvutit, mille tehnilised parameetrid on järgmised:

- operatsioonisüsteem: Windows 10 Pro 64-bit;
- protsessor: Intel (R) Core (TM) i7-7770HQ CPU 2.81 GHz;
- videokaart: Nvidia GeForce 940 GX;
- muutmälu: 8 GB
- mälumaht: 512 GB SSD.

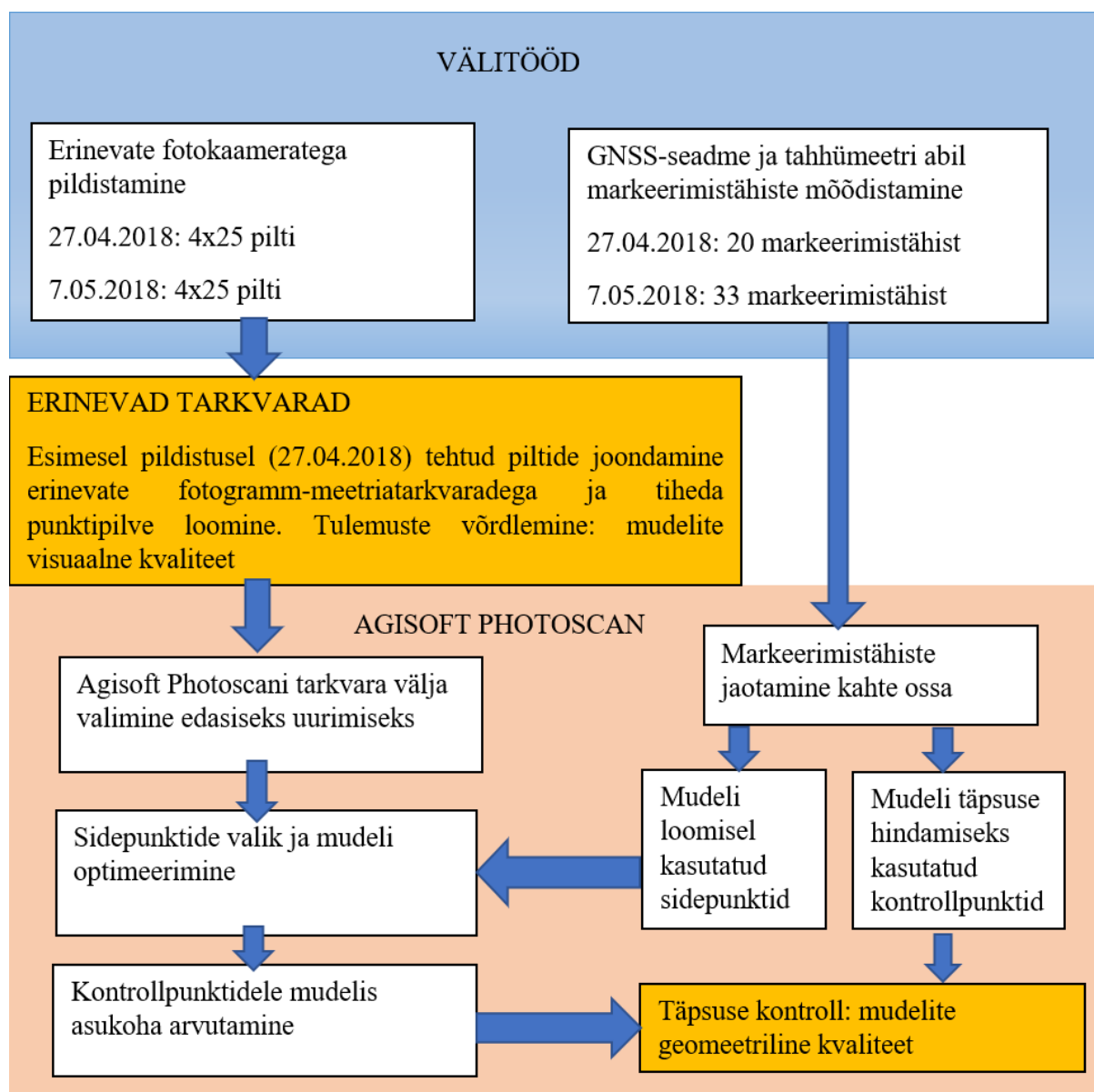
Edasine andmetöötlus toimus Tartu Ülikooli arheoloogia õppetooli oluliselt võimsama arvutiga. Fotogramm-meetriliste mudelite ehitamiseks on määrava tähtsusega just muutmälu suurus.

Tartu Ülikooli arheoloogia õppetooli arvuti tehnilised näitajad on järgmised:

- operatsioonisüsteem Windows 10 Enterprise 64-bit;
- protsessor: Intel (R) Core (TM) i7-3770K CPU 3.50 GHz;
- videokaart: Nvidia GeForce GTX 670;
- muutmälu: 32 GB;
- mälumaht: 340 GB SSD + 1.8 TB.

2.2. Metoodika

Käesoleva töö metoodika võtab kokku alljärgnev skeem (joonis 4).



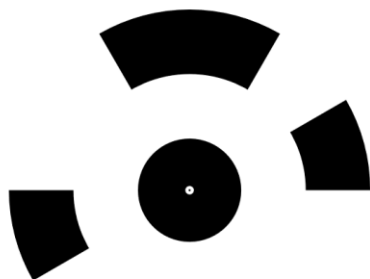
Joonis 4. Uurimistöö metoodiline skeem.

Järgnevatel peatükkidel antakse metoodikast ülevaate töetappide kohta – esmalt välitöödest ja siis andmetöötlusest.

2.3. Vältööd

2.3.1. Objekti ettevalmistus

Enne pildistama ja mõõtma asumist eemaldati objektilt sinna kasvanud peenike võsa, paigaldati markeerimistähised (joonised 5 ja 6) ja märgiti värviga maha pildistamise asukohad ja suunad. Tähistid paigaldati võimalikult ühtlaselt kogu modelleeritava ala alale – osad kinnitati naeltega maapinnale, teised müüriale. Just viimasel juhul sai asukoha valikul määravamaks sobiva kinnituskoha leidmine – mitte kõikjal müüril polnud võimalik markeerimistähiseid püsivalt kinnitada, valiti kohad, kus mört pehmem või kivide vahele oli kogunenud pinnast. Esimesel pildistuskorral paigaldati 20 markeerimistähist, teisel 30. Osad markeerimistähised olid trükitud viiekaupa samale A4 paberile, garanteerimaks vähemalt mõne markeerimistähisi tuvastamise hoolimata võimalikust halvast pildistamisnurgast või ette jäävast taimestikust². Markeerimistähised trükiti programmist Agisoft Photoscan ja see programm on võimeline need automaatselt tuvastama. Tähistid on nummerdatud ja need on kõik unikaalsed.



3

Joonis 5. Kärkna kloostri müürilõigu pildistamisel kasutatud markeerimistähise näide

² Selline ettevaatlik lähenemine valiti osaliselt sel põhjusel, et lõputöö ettevalmistavas faasis proovipildistamisel Helme kabeli varemetes kasutati Agisoft Photoscani varasemast versioonist trükitud tähistid ning nendest tundis kasutatav tarkvara versioon ära vaid üksikud.



Joonis 6. Automaattuvastatavad markeerimistähised on paigutatud uuritavale objektile.

Lisaks markeerimistähistele paigutati pildistatavale objektile ka 2-meetrine kokkupandav joonlaud, et fotogramm-meetriprogrammis selle mõõtmeid erinevate kaamerate poolt tehtud mudelite puhul kontrollida, aga nagu allpool selgub, ei jäänud see fotodel piisavalt selgesti tuvastatav ja numbrid loetavad.

2.3.2. Markeerimistähiste mõõtmine

Markeerimistähised mõõdeti tahhümeetriga ühest seisupunktist prismata lasermõõtmise meetodil (joonis 7). Reflektorkleepsude kasutamine selleks tarbeks ei tulnud kõne alla, kuna fotogramm-meetriprogrammidel on raske tuvastada ja modelleerida läikivaid esemeid. Tahhümeetri tootjapoolse spetsifikatsiooni kohaselt on prismata mõõtmise täpsus 2,0 mm + 2 ppm (Trimble tahhümeetrid... 2016).

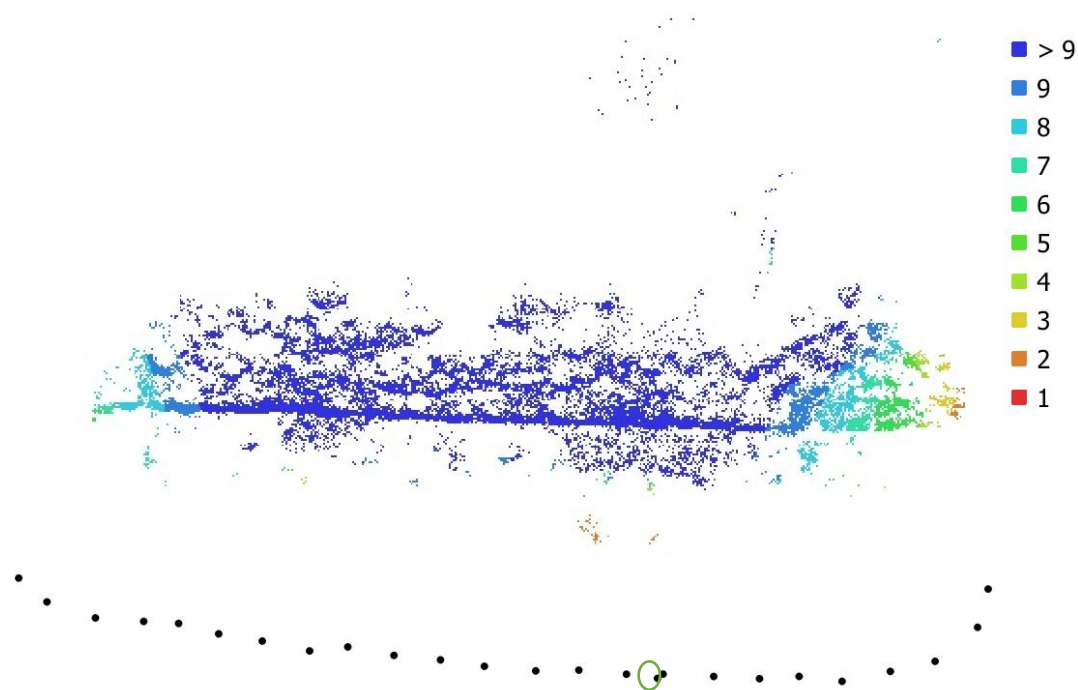


Joonis 7. Markeerimistähiseta varustatud müürilõik Kärkna kloostri varemetes ja mõõtmiseks kasutatud tahhümeeter Trimble S5

Mõõdistus teostati L-Est97 koordinaatsüsteemis ja EH2000 kõrgussüsteemis – viimase tarbeks oli väliarvutus aktiveeritud Eesti Maaülikooli tudengite poolt Harli Jürgensoni juhendamisel loengukursuse “Kõrgem geodeesia” raames loodud geoidi mudel.

2.3.3. Pildistamine

Pildistati kaks korda: 27. aprillil ja 8. mail 2018. Mõlemal korral oli pildistamise käik sarnane. Pildistati nelja erineva kaameraga. Iga kaameraga tehti kokku 25 pilti, neist 24 pikisuunalist e rõhtpaigutusega ja 1 pöikisuunaline e püstpaigutusega (kõikidel juhtudel samas asukohas). Püstpaigutusega pilt tehti kuna tarkvaratootjad soovivad seda – niimoodi saab programm kaamera automaatse kalibreerimise jaoks täiendavaid andmeid ja tulemus tuleb täpsem (Agisofti Photoscan... 2018, Niederheiser jt 2016: 686). Pildistamisteed valiti selliselt, et tulemuseks oleks piisava ülekatttega fotod, mis on pildistatud võimalikult otse müüri suunas (joonis 8).



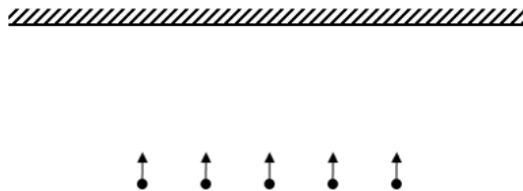
Joonis 8. Kaamera asukohad ja piltide ülekate programmi Agisoft Photoscan poolt arvatuna. Pealtvaade. ○ Püstformaadis foto asukoht. Värvikoodidega on kuvatud fotode hulk, millelt on tuvastatud ühiseid punkte. Ühiste punktidega fotode hulk: ■ > 9; ■ 9; ■ 8; ■ 7; ■ 6; ■ 5; ■ 4; ■ 3; ■ 2; ■ 1.

Pildistamisteenuse valikul arvestati Agisoft Photoscani tarkvara kasutusjuhendis soovitatuga (joonis 9) ja müürifragmenti ümbritsenud maastiku, taimestiku ning konstruktsioonidega – viimased, joonisel parempoolsed kaamera asukohad on tingitud sellest, et pildistamiseks tuli ronida uuritava müürifragmentiga ristuva müüri peale.

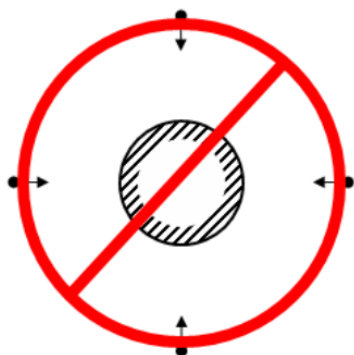
Pildistamiskohad ja suunad olid värviga maapinnale märgitud. Pildistamine toimus lühikese aja jooksul, mil valgusolud märgatavalt ei muutunud. Esimesel pildistamiskorral oli pildistamiseks erakordselt hästi sobiv ühtlaselt pilves ilm. Teisel korral paistis lauspäike, aga õnneks soodsa nurga alt, nii et objekt oli ühtlaselt tugevalt valgustatud aga ilma teravate varjudeta. Pildistati ilma statiivita. See valik toetus Martin Kanguri lõputöö tulemustele, mille kohaselt statiivilt pildistamisel ei ole mudeli kvaliteedi osas eeliseid käest pildistamise ees (Kangur 2016: 42–43). Peegelkaamerate parameetrid sisestati käsitsi, kasutades väikest valgustundlikkust (ISO100), ka objektiivi ava suhteline läbimõõt hoiti võimalikult väike, saavutamaks müravabad ja ühtlaselt teravad pildid. Kompaktkamerad võimaldasid automaaseadeid.



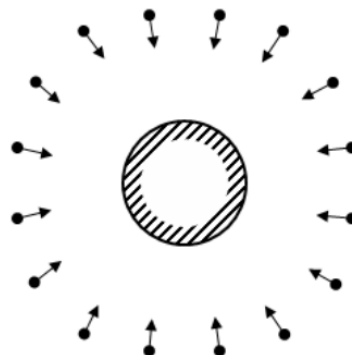
Vale pildistamistekond fassaadi fotografeerimisel



Õige pildistamistekond fassaadi fotografeerimisel



Vale pildistamistekond eraldiseisva objekti fotografeerimisel



Õige pildistamistekond eraldiseisva objekti fotografeerimisel

Joonis 9. Soovituslikud pildistamistekonna valikud 1) fassaadi pildistamiseks ja 2) eraldiseisva objekti pildistamiseks (Agisoft Photoscan... 2018).

Pegelkaamerate puhul kasutati pildistamiseks ühtsama objektiivi, teisel pildistamiskorral 8. mail pöörati ka tähelepanu sellele, et pildistamise seaded (valgustundlikkus, ava suurus ja säriaeg) oleksid võimalikult identsed.

2.4. Andmetöötlus

2.4.1. Hõredate ja tihedate punktipilvede loomine ja võrdlus

Kuna enne käesoleva töö alustamist ei olnud töö autorile üheselt selge, kas mobiiltelefoni kaameraga tehtud piltidest on üldse võimalik 3D mudelit kokku panna, prooviti 27.04.2018 erinevate kaameratega tehtud piltidest esmaseid mudeleid kokku panna erinevate tarkvarade abil. Uurimustöös kasutati Agisoft Photoscan 1.4.1 ja Pix4D 4.2.27 ja vabavarilist programmi Visual SFM koos tiheda punktipilve loomise mooduliga Yasutaka Furukawa's CMVS tool. Mudeleid ei georefereeritud. Kõikide tarkvarade tööprotsess on intuiitselt mõistetav ja sarnane: isegi vabavaralisel tarkvaral Visual SFM oli suhteliselt mugav graafiline kasutajaliides. Esmalt imporditi fotod programmidesse, kus fotoplokid moodustatakse tarkvara algoritmide kohaselt. Programmid leiavad fotodelt iseloomulikud punktid, arvutavad nendele tunnusvektorid, mille alusel fotod omavahel kokku panevad ehk joondavad. Kaameratele ja punktidele leitakse asukoht ruumis ning arvutatakse kaamerate arvatavad positsioonid pildistamise ajal. Piltide joondamisega samaaegselt luuakse esmane 3D mudel ehk hõre punktipilv. Lisaks kujutistele kasutavad kõik programmid fotodega kaasas olevat metaandmestikku (EXIF-data). Agisoft Photoscani kasutusõpetuses (Agisoft... 2018: 10) on välja toodud, et programm arvutab piksli suuruse ja objektiivi parameetrid kasutades EXIF-data andmeid, seetõttu on oluline, et need poleks fotodelt eemaldatud. Kõikide programmide puhul joondati täisresolutsioonis pilte. Võrreldi, kui suure hulga piltide joondamisega tarkvarad erinevate kaamerate puhul hakkama said ja kui palju iseloomulikke punkte leiti (vt allpool lk 38).

Järgmise sammuna arvutati kõikide programmidega tihedad punktipilved (*dense point cloud/densified point cloud*). Agisoft Photoscani 3D tiheda punktipilve loomisel valiti kvaliteediks kõrge e *High* (valikuid oli kokku 5, kõrgeim neist *Highest*), Pix4D ja Visual SFM-i puhul kasutati maksimaalset võimalikku kvaliteeti, mille tulemusena luuakse võimalikult suure punktide hulgaga tihe punktipilv. Punktipilvede hindamisel jälgiti, et seal ei oleks suuremaid auke, et punktipilv kataks kogu uuritava müürilõigu ühtlaselt. Tihedate punktipilvede võrdlemise tulemusel otsutati edasi töötada vaid programmiga Agisoft Photoscan

– vaid selle programmiga saadi ka telefoni kaameraga tehtud piltidest suhteliselt hea katvusega tihe punktipilv (joonis 10).



Joonis 10. Telefoni kaameraga tehtud fotodest programmi Agisoft Photoscan abil loodud tihe punktipilv.

Ülejäänud tihedad punktipilved on toodud lisades 1-4. Mõlema peegelkaamera ja kompaktkamera Canon Ixus 185 abil tehtud piltide puhul programmidel Pix4d ja Agisoft Photoscan märgatavat vahet ei olnud (erinevust on märgata taimestikuga kaetud pinnal), programmi Visual SFM punktipilvede katvus on aga kõikidel juhtudel oluliselt halvem.

2.4.3. Agisoft Photoscani abil loodud mudelite georefereerimine ja nende täpsuse võrdlemine

Esmased hõredad punktipilved luuakse fotogramm-meetria programmi poolt suhtelises koordinaatsüsteemis (vt Liba 2005: 170). Reaalmaailma koordinaatsüsteemiga seotakse need, kasutades mõõdistatud sidepunkte (*Ground Control Points*). Markeerimispunktidenä on kõige mugavam kasutada spetsiaalseid tähiseid, mille fotogramm-meetriaprogramm automaatselt tuvastab (joonis 11).



Joonis 11. Automaattuvastatavad markeerimistähised uuritaval müürilõigul ja selle ümbruses.

Mudeli täpsuse hindamiseks kasutati mõõdistatud kontrollpunkte (*Check Points*). Tegemist on täpselt samade automaattuvastatavate markeerimistähistega, aga konkreetse mudeli hindamise puhul kasutatakse side- ja kontrollpunktidenä erinevaid punkte. Algselt kavatseti kasutada geomeetrilise kvaliteedi hindamiseks ka lihtsalt joonlauda, kuid mitte ühegi kaameraga tehtud piltidel ei jäänud uuritvale objektile asetatud kokkupandava joonlaua kujutis täpsete mõõtmiste teostamiseks piisavalt terav (joonis 12).



Joonis 12. Kokkupandav joonlaud pole fotodel piisavalt terav, et selle abil mudeli täpsust hinnata.

Kindlasti mõjutab side- ning kontrollpunktide hulk ja asend mudeli täpsust (vt nt Sepp jt 2016: 54 jj), aga eeldati, et erinevate kaameratega tehtud fotodest mudelite puhul on see mõju samasugune. Pistelised kontrollarvutused seda ka kinnitasid, sellist side- ja kontrollpunktide

kombinatsiooni ei tuvastatud, mis oleks ühe kaameraga tehtud piltide puhul mudeli täpsust suurendanud ja teise puhul vähendanud. Näiteks suurem sidepunktide hulk või parema katvusega sidepunktid suurendasid kõikide kaameratega tehtud mudeli täpsust jne.

8.05. tehtud pildistuse fotode puhul ei suutnud programm tuvastada kõikide kaameratega tehtud piltide puhul kõiki markeerimistähiseid. Analüüsi kaasati ainult need tähised, mis tuvastati ka kõige halvemal juhul, telefoni kaameraga tehtud fotodest mudelil. Esimese pildistuse puhul võrreldi mudeleid, millel oli 4 side- ja 16 kontrollpunkti, teise pildistuse fotodest tehti võrdluse tarbeks 7 sidepunkti ja 19 kontrollpunktiga mudelid.

Tabel 2. Fotogramm-meetriaprogrammi poolt automaatselt tuvastatud tähiste hulk

Kaamera	Tuvastatud markeerimistähiste hulk
Canon EOS 760D	29
Canon EOS 600D	29
Canon Ixus 185	30
Sony Xperia Z1	26

Nii side- kui kontrollpunktide koordinaadid on oma tööle võimalik sisestada otse Agisoft Photoscani programmi ja siis arvutab programm ise välja koordinaatide hälbed ning koordinaatide keskmised ruutvead Gaussi valemi (valem nr 1) järgi:

$$m = \pm \sqrt{\frac{\sum \Delta^2}{n}} \quad (1), \text{ (Randjärv 1997: 262),}$$

kus Δ^2 on programmi poolt arvutatud markeerimistähiste asukohtade koordinaatide ja programmi sisestatud tahhümeetrilise mõõdistamise teel saadud koordinaatide vahede (hälvete) ruutude summa ja n on kontrollpunktide (mõõtmiste) arv.

Keskmise ruutvea m enda täpsust arvutatakse valemiga (valem nr 2):

$$m_m = \pm \frac{m}{\sqrt{2n-1}} \quad (2), (\text{Randjärv } 1997: 263),$$

kus m on keskmine ruutviga ja n on mõõdetud punktide arv.

Programm Agisoft Photoscan arvutab iga punkti vea valemiga (valem 3)

$$m = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2} \quad (3), (\text{Pasumansky } 2014),$$

mis näitab programmi poolt arvutatud punkti kaugust mõõdetud punktist kolmemõõtmelises ruumis. Δx^2 on programmi poolt arvutatud L-Est97 koordinaatsüsteemi y-koordinaadi ja tahhümeetriselt mõõdistatud y koordinaadi vahe ruut, Δy^2 sama L-Est97 koordinaatsüsteemi x-koordinaadi ja Δz^2 kõrguse (EH2000) osas.

Mudeli koguviga arvutatakse järgmise valemiga (valem 4):

$$m(\text{mudel}) = \sqrt{\sum \Delta x^2 + \sum \Delta y^2 + \sum \Delta z^2} \quad (4), (\text{Pasumansky } 2014),$$

kus $\sum \Delta x^2$ on L-Est 97 koordinaatsüsteemi y-koordinaadi hälvete ruutude summa $\sum \Delta y^2$ L-Est koordinaatsüsteemi x-koordinaadi hälvete ruutude summa ja $\sum \Delta z^2$ kõrguslike hälvete ruutude summa. Arvutustulemuste näide on toodud tabelis 3. Ülejäänud arvutustulemused on toodud lisas 6.

Mudelite täpsuse hindamisel vaadeldakse nii kõikide koordinaatide keskmist ruutviga kui valemi 4 järgi arvutatud mudeli koguviga, sest viimane iseloomustab mudeli hälvimist kõigi kolme koordinaadi osas üheaegselt.

Tabel 3. Kontrollpunktide mõõdetud koordinaatide ja Agsioft Phtoscani programmi poolt arvutatud koordinaatide hälbed, ruutvead ja koguvead 27.04.2018 kaameraga Canon EOS 600D pildistatud fotodest tehtud 3D mudelil. (Programm kasutab koordinaattelgede matemaatilist tähistust.) Tabelisse on lisatud keskmise ruutvea täpsus, mida vaadeldav programm ei arvuta

Markeermistähis nr	$\Delta X(\text{mm})$	$\Delta Y(\text{mm})$	$\Delta Z(\text{mm})$	Kokku (mm)***
1	2.012	0.859	0.138	2.192
2	1.769	-0.026	-0.581	1.862
3	1.178	-0.066	0.299	1.218
4	2.071	-0.383	0.437	2.151
6	-0.846	1.611	0.286	1.842
8	-1.295	-1.635	0.266	2.103
9	-1.106	0.134	0.415	1.189
11	1.519	0.654	-2.270	2.808
12	-3.469	-3.245	-1.709	5.048
13	2.096	0.920	-1.350	2.657
14	7.094	5.106	-1.580	8.882
16	-1.676	1.298	-2.436	3.229
17	-2.710	0.065	-2.564	3.731
18	-1.623	1.950	-1.959	3.205
19	-1.625	-0.499	-1.406	2.206
20	-0.789	2.774	-1.649	3.322
Keskmine ruutviga (mm)*	2.520	1.895	1.466	
Keskmise ruutvea enda	0.468	0.352	0.272	
täpsus (mm)**				
Mudeli koguviga (mm)				3.477****

* Valem nr 1.

** Valem nr 2.

*** Valem nr 3.

**** Valem nr 4.

Vigade arvutamiseks valiti programmis Agisoft Phtoscant välja soovitud sidepunktid ja programm joondas enda algoritmide kohaselt nende sidepunktide andmetele toetudes fotod uuesti ning moodustas uued tihedad punktipilved. Alguses prooviti vigu hinnata uuesti joondatud hõredate punktipilvede korral, katseliselt selgitati välja, et tihedate punktipilvede loomisel parandas programm ka markeermistähiste oletatavat asukohta ja veahinnangud tulid sel moel väiksemad. Vigade hindamiseks ei loodud kolmnurkade võrgustikku ega tekstuuriga mudelit, kuna need tööetapid on kõige suuremat arvutusvõimust ja rohkemat aega nõudvad ning nende käigus markeerimispunktide asukohad mudelil enam ei muutu.

3. TULEMUSED JA ARUTELU

3.1. Tarkvara ja kaamera valiku mõju: mudeli kvaliteedi visuaalne hindamine ja punktipilvede tiheduse võrdlemine

Eksperimendi käigus valminud 3D mudelite kvaliteedi visuaalsel hindamisel selgus, et kaamera ja tarkvara valik mängivad olulist rolli. Sarnast analüüsi on korduvalt varem tehtud, kuid kommertstarkvarasid arendatakse pidevalt edasi ja paari aastaga võib olukord märgatavalt muutuda. Niederheiser jt (2016) on andnud üsna põhjaliku ülevaate erinevate tarkvarade ja kaamerate mõjust tihedate 3D punktipilvede loomisel, nemad kasutasid Agisoft PhotoScan Pro versiooni 1.16 ja Pix4D versiooni 2.0.89. Uurimustöös kasutati Agisoft Photoscan 1.4.1 ja Pix4D 4.2.27, võrdluse lisati ka vabavaraline programm Visual SFM koos tiheda punktipilve loomise mooduliga Yasutaka Furukawa's CMVS tool. Arvestades, et mõlemad kommertstarkvarad on jõudsalt sisenenud ka geodeesiavaldkonda ning konkurents on tihe, oleks muutused ootuspärased.

Eksperiment kinnitas, et jätkuvalt edestab Agisoft Photoscani tarkvara oma konkurenti kui küsimuse all on keerulise, taimestikuga kaetud pinna modelleerimine. Eriti märgatav oli vahe siis, kui kasutati telefoni kaamerat – vaid Agisoft Photoscani tarkvara suutis telefoni kaameraga tehtud fotodest kõik joondada ja nendest hea katvusega 3D mudeli (tiheda punktipilve) luua. Pix4D joondas telefoniga tehtud 25 pildist 22 (tabel 4), ülejäänud kaamerate puhul sai programm hakkama samuti kõigi piltide joondamisega. Programm Visual SFM joondas alguses samuti kõik pildid, aga võrreldes kahe kommertstarkvaraga leidis programm fotodelt oluliselt vähem iseloomulikke punkte. Näiteks Canon EOS 600 D puhul leidis Agisoft Photoscan üle 70 000 iseloomuliku punkti ja Visual SFM-i üle 18 000 (tabel 4). Tiheda punktipilve loomise algoritm (Yasutaka Furukawa's CMVS tool) tekitas tiheda punktipilve vaid nendes kohtades, kus Visual SFM oli iseloomulikke punkte piisavalt tihedalt leidnud, nii on Lisas 1 esitletud joonistel tiheda punktipilvega kaetud vaid pildistatud objekti keskosa.

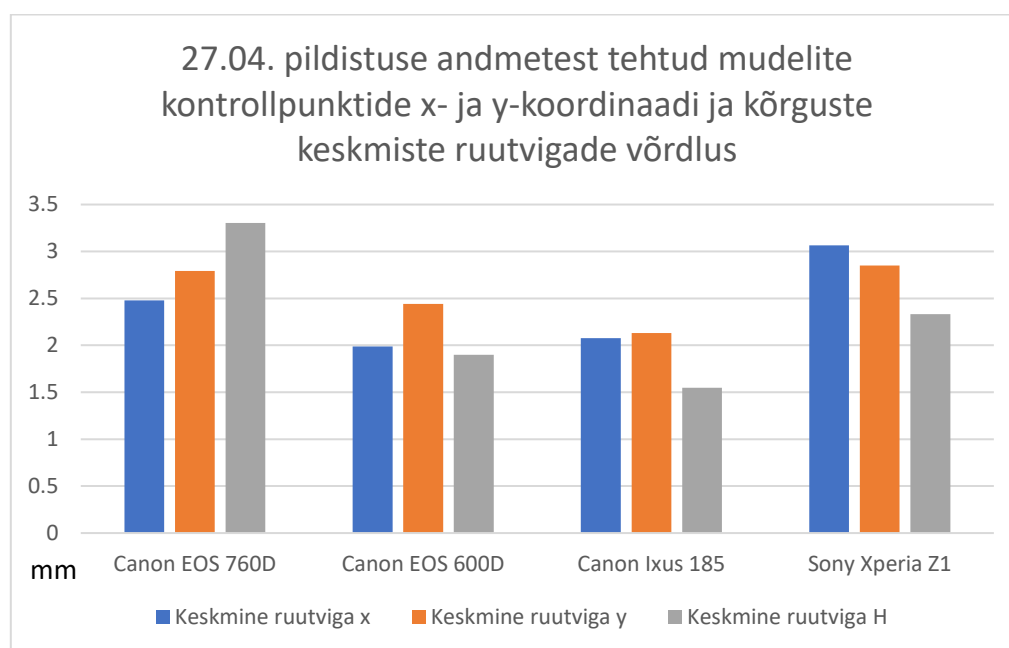
Tabel 4. Joondatud fotode hulk ja fotogramm-meetriaprogrammi poolt tuvastatud iseloomulike punktide arv eri fotokaamerate ja tarkvarade puhul

Kaamera	Programm	Joondatud fotode hulk	Iseloomulike punktide hulk
Canon EOS 760D	Visual SFM	25/25	14332
	Pix4D	25/25	171133 3D punkti 417542 2D punkti
	Agsioft Photoscan	25/25	70543
Canon EOS 600D	Visual SFM	25/25	18346
	Pix4D	25/25	158712 3D punkti 374230 2D punkti
	Agsioft Photoscan	25/25	71276
Canon Ixus 185	Visual SFM	25/25	6601
	Pix4D	25/25	121451 3D punkti 284766 2D punkti
	Agsioft Photoscan	25/25	53962
Sony Xperia Z1 telefoni kaamera	Visual SFM	25/25	3922
	Pix4D	22/25	72976 3D punkti 156061 2D punkti
	Agsioft Photoscan	25/25	61746

Tihedate punktipilvede välimuses osas edestasid mõlemad kommertstarkvarad vabavaralist Visual SFM ja Yasutaka Furukawa's CMVS tool'i.

3.2. Tarkvara Agisoft Photoscan abil loodud mudelite geomeetrilise kvaliteedi hindamine

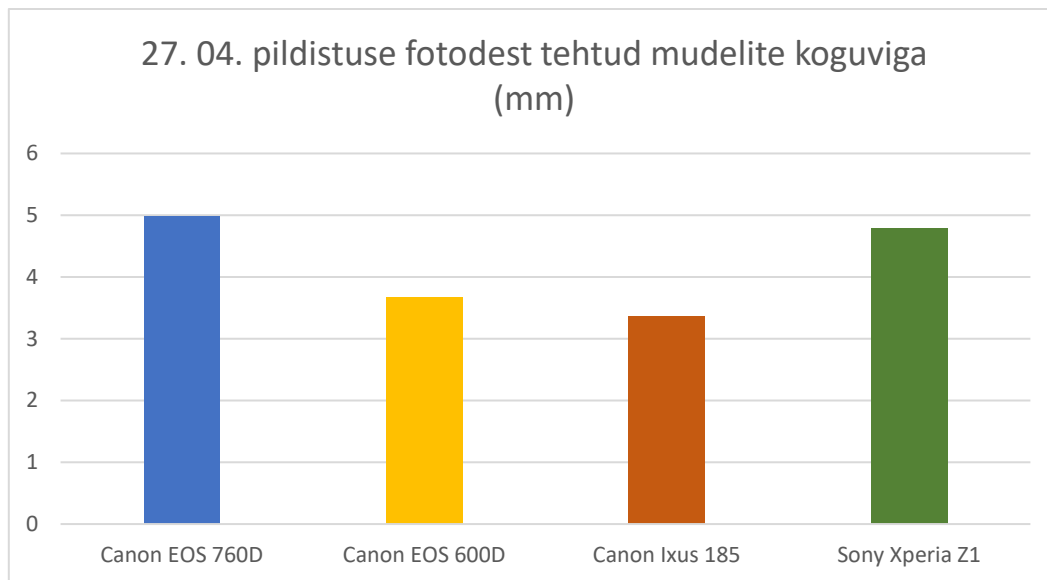
Kui mudelite kvaliteedi visuaalse hindamise tulemused olid ootuspärased, siis mudelite täpsuse hindamine andis üllatavaid resultate. Mõlema pildistamiskorra puhul tulid kaameratega Canon Ixus 185 ja Canon EOS 600D tehtud fotodest loodud 3D mudelite koguvead väiksemad kui Canon EOS 760D ja nutitelefoniga kaameraga tehtud fotodest loodud mudelite koguvead (joonised 14 ja 16, 17). Tabelid tahhümeertilise mõõdistamise andmetega ja mudelite vigade arvutustega on toodud lisades 1–9. Lisaks koguvigade võrdlemisele vaadeldi eraldi x- ja y-koordinaadi ka kõrguse keskmisi ruutvigu erinevate mudelite puhul (joonised 13 ja 15). Valemid, mille alusel vead on arvutatud, on toodud ülalpool (valemid 1–4 lk 33–34).



Joonis 13. Esimese pildistuse mudelite koordinaatide keskmised ruutvead.

Esimese pildistamise fotodest tehtud mudelite puhul oli x-koordinaadi suurim keskmine ruutviga (KRV) 3,07 mm Sony Xperia Z1 kaamera puhul ja väikseim 1,99 mm Canon EOS 600D puhul. Y-koordinaadi suurim keskmine ruutviga on 2,85 mm, mis saadi samuti kaameraga Sony Xperia Z1, kõige väiksem 2,13 mm (kaameraga Canon Ixus 185). Kõige suurem on

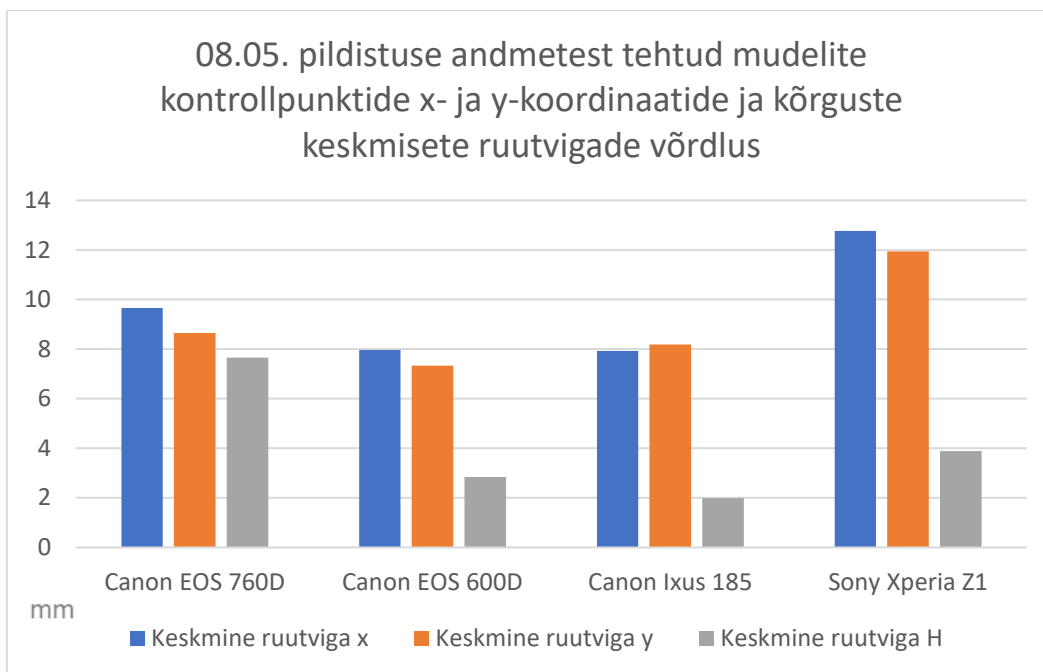
kõrguslik viga Canon EOS 760D puhul (KRV 3,30 mm) ja väikseim Canon Ixus 185 puhul (KRV 1,55 mm).



Joonis 14. Esimese pildistuse mudelite vigade võrdlus.

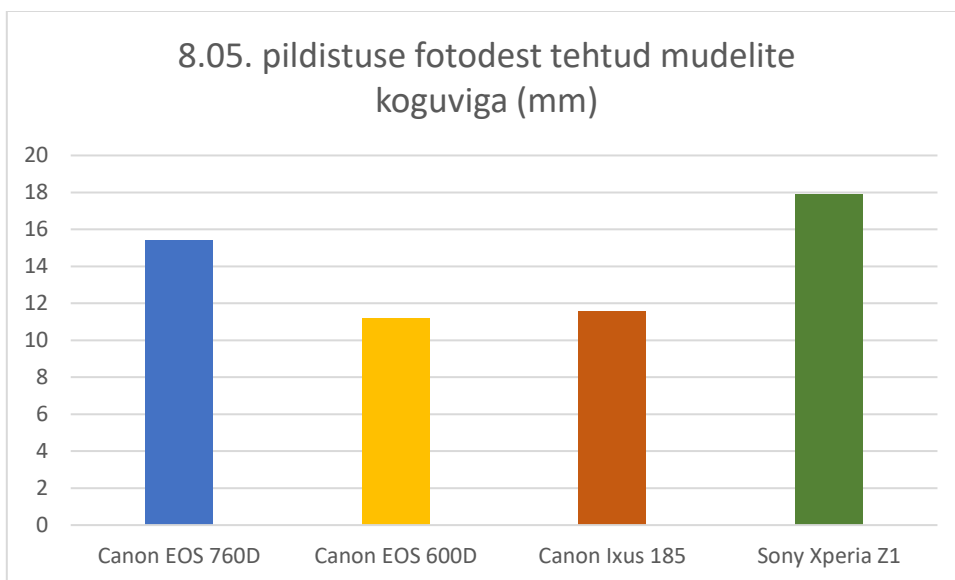
Joonis 14 demonstreerib, et koguviga on suurim kaameraga Canon EOS 760D pildistatud fotodest tehtud mudelil (4,99) ja väikseim Canon Ixus 185 pildistatud fotodest tehtud mudelil (3,35 mm).

Teise pildistamise fotodest tehtud mudelitel (joonis 15) oli x-koordinaadi suurim keskmine ruutviga (KRV) 12,770 mm Sony Xperia Z1 kaamera ja väikseim 7,923 mm Canon Ixus 185 kaamera puhul. Y-koordinaadi suurim KRV on 11,94 mm (kaamera Sony Xperia Z1) ja kõige väiksem KRV 7,329 mm (kaamera Canon EOS 600D). Kõige suurem kõrguslik viga (KRV 7,66 mm) saadi kaamera Canon EOS 760D fotodest tehtud mudeli puhul ja väikseim Canon Ixus 185 (KRV 12,00 mm) puhul.



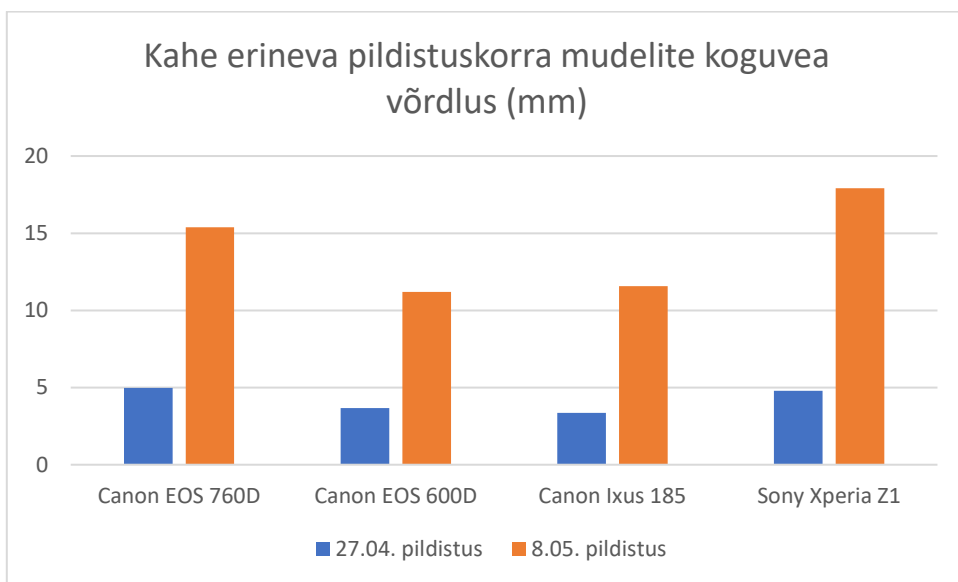
Joonis 15. Teise pildistuse mudelite koordinaatide keskmised ruutvead.

Nagu näha jooniselt 16, oli teise pildistuskorra mudelitest kõige suurem koguviga Sony Xperia Z1 nutitelefoni pildistatud fotodest tehtud mudelil (17,91 mm) ja kõige väiksem (11,19 mm) kaamera Canon EOS 600D pildistatud fotodest tehtud mudelil.



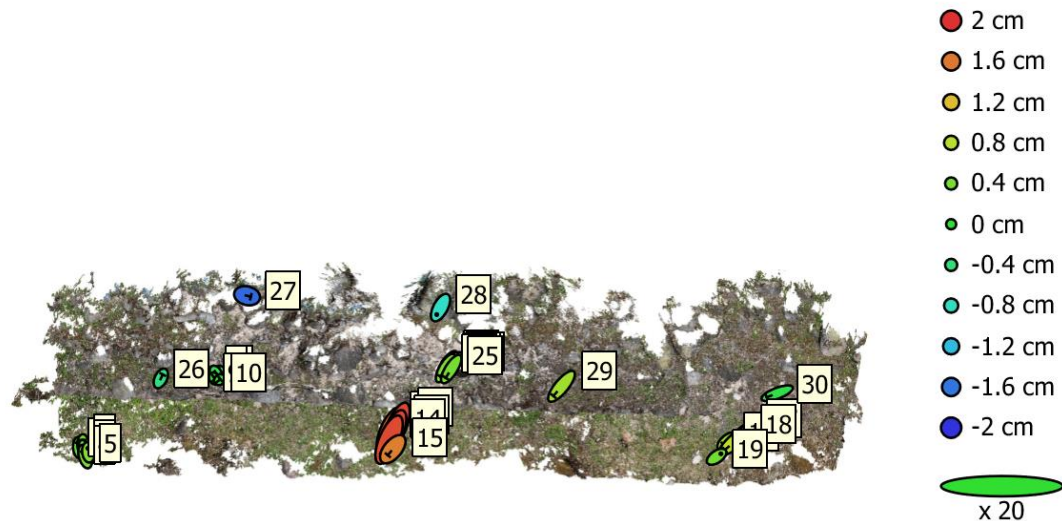
Joonis 16. Teise pildistuse mudelite vigade võrdlus.

Esimese ja teise pildistuskorra mudelite puhul on märgatav täpsuse vahe (joonis 17) – esimesed mudelid on täpsemad, koguvead jäävad vahemikku 3,4 mm ja 5,0 mm. Teisel korral on koguvead 11,2 mm kuni 17,9 mm. Kahel pildistuskorral erines side- ning kontrollpunktide hulk. Kuna teisel korral paigutati markeerimistähiseid rohkem ja ühtlasemalt kogu uuritavale pinnale, loodeti tulemuseks saada täpsem mudel.



Joonis 17. Kahe erineva pildistuskorra erinevate kaameratega tehtud fotodest loodud mudelite vigade võrdlus.

Vastupidist tulemust, teise pildistuskorra mudelite suhteliselt suurt ebatäpsust põhjendavad oletatavasti paremad valgusolud esimese pildistamise ajal ning asjaolu, et võrreldes varasema pildistusega oli 8.05. pildistuse ajal lisandunud taimeistikku, mis muudab fotogramm-meetriaprogrammi jaoks piltidelt iseloomulike punktide leidmise ja pindade modelleerimise keerulisemaks. Samuti võib täpsushinnangut mõjutada asjaolu, et lisaks enamatele sidepunktidele jäi ka rohkem kontrollpunkte mudeli äärealadele ja raskesti modelleeritavatele kohtadele. Näiteks tehti teise pildistuskorra piltidest võrdluseks mudel kolme sidepunktiga, millest kaks asusid maas ja üks müüri ülaosas. Suurimad veahinnangud on programm arvutanud kontrollpunktidele, mis asuvad samuti maas, taimestiku keskel (joonis 18).



Joonis 18. Agisoft Photoscani poolt genereeritud veahinnang kontroll- ja sidepunktidele 8.05. kaameraga Canon EOS 760D pildistatud fotodest tehtud mudelil. Pealtvaade. Sidepunktid on 5, 19 ja 28. Plaanilist viga iseloomustab tähise värv ja kõrguslikku viga ellipsi suurus.

Kuna Agisoft Photoscan on suletud koodiga kommertstarkvara, jääb selgusetuks, miks ja kuidas programm erinevate kaameraga tehtud piltidest just sellise täpsusega mudelid kokku pani. Telefoni kaamera halvem tulemus võrreldes teiste kaameratega oli ootuspärane, aga Canon EOS 760D puhul oodati paremat tulemust. Nagu ülalpool mainitud, olid teisel pildistuskorral pildistamise parameetrid (ISO, ava, säri) Canon EOS 600D ja Canon EOS 760D puhul identsed, täpselt sama oli ka objektiiv. Pildistamise asukohad ja pildistaja isik olid samuti samad. Erinevus oli vaid selles, et Canon EOS 760D lahutusvõime on suurem Canon EOS 600D omast (vt tabel 1). Lahutusvõime näitaja on ka Sony Xperia Z1 kõrgem teistest võrdluses kasutatud kaameratest, kuid vahed pole siiski kuigi suured.

KOKKUVÕTE

Fotokaameraga tehtav maapealne lähifotogramm-meetria on tavakasutajale taskukohaste kommertstarkavarade ja vabavaraliste fotogramm-meetriaprogrammide tõttu muutunud kättesaadavaks paljudele huvilistele. 3D mudeleid, fotomosaiike ja muid fotogramm-meetriatooteid on võimalik luua ka võimekamate sülearvutite abil, kasutades mudeli loomiseks mistahes saadaoleva kaameraga tehtud fotosid. Selliseid mudeleid kasutatakse väga erinevates valdkondades nii teadusliku uurimise tarbeks kui kommertseesmärkidel. Käesolev töö keskendus arheoloogilisele dokumenteerimisele lähifotogramm-meetrilise meetodiga.

Uurimuses vaadeldi, missuguse tarkvaraga on erinevate hinnaklasside ja tehniliste omadustega kaamerate abil tehtud fotodest kõige mugavam ja otstarbekam teha võimalikult hea katvusega tihedaid punktipilvi. Võrreldi kahe kommertstarkvara (Agisoft Photoscan ja Pix4D) ning ühe vabavaralise programmi (Visual SFM ja tihedate punktipilvede loomise moodul Yasutaka Furukawa's CMVS tool) poolt loodud tihedaid punktipilvi. Kultuurimälestist – Kärkna kloostri varemete müürilõiku – pildistati nelja erineva kaameraga samadest asukohtadest. Iga kaameraga tehti 25 pilti, mis sisestati erinevatesse fotogramm-meetriaprogrammidesse. Programmid joondasid fotod, otsisid neilt välja iseloomulikud punktid ja löid selle alusel esmase 3D mudeli – hõreda punktipilve ning seejärel tiheda punktipilve.

Vabavaraline lahendus jäi fotodelt iseloomulike punktide tuvastamise võimelt selgelt alla kommertstarkvaradele ja saadud tihedad punktipilved katsid vaid uuritava ala keskosa. Spetsiaalsete fotokaameratega (peegelkaamerad Canon EOS 760D, Canon EOS 600D ja kompaktkamera Canon Ixus 185) tehtud fotodest tegid mõlemad kommertstarkvarad visuaalse hindamise kohaselt üsna võrdsed mudelid, nutitelefoni kaameraga tehtud fotodest tegi hea katvusega punktipilve aga ainult programm Agisoft Photoscan.

Põhiliseks uurimisküsimuseks oli, kas ja kuidas mõjutab kaamera valik fotodest tehtud mudelite geomeetrilist täpsust. Kuna vaid Agisoft Photoscan tegi hea katvusega mudeli ka mobiiltelefoni kaameraga tehtud piltidest, vaadeldi geomeetrilist täpsust selles programmis

loodud mudelite puhul. Objekti pildistati kahel korral, et erinevate pildistuskordade tulemusi omavahel võrrelda. Geomeetrilise täpsuse hindamiseks varustati uurimisobjekt markeerimistähistega, mille asukoht mõõdistati tahhümeetriliselt. Osa tähiseid kasutati sidepunktidenä mudeli georefereerimiseks ja teist osa kontrollpunktidenä mudeli täpsuse hindamiseks. Tahhümeetriliselt mõõdistatud kontrollpunktide asukohtade ja programmi poolt arvutatud asukohtade vahede keskmiste ruutvigade alusel hinnati mudelite täpsust.

Uurimishüpoteesiks oli, et peegelkameratega tehtud fotodest saab täpsemad mudelid. Uurimistöö autoril oli soov demonstreerida, et ka nutitelefoniga kaameraga saab tulemuseks arheoloogilise dokumenteerimise seisukohast piisava täpsusega mudeli. Tulemused olid üllatavad. Mõlema pildistamiskorra fotodest tehtud 3D mudelite puhul saadi täpsemad mudelid kaameratega Canon EOS 600D ja Canon Ixus 185 tehtud fotodest. Esimesel pildistuskorral oli üllatuslikult kaameraga Canon EOS 760D pildistatud fotodest tehtud mudeli koguviga suurim, teisel korral oli ootuspäraselt kõige ebatäpsem nutitelefoniga fotodest tehtud mudel. Loomulikult võib vaielda, et pildikvaliteedi puhul on oluline mitte ainult kaamera omadused vaid ka pildistaja oskused. See aga ei seleta, miks samade oskuste juures on kaamera Canon EOS 600D fotodest tehtud mudelite tulemused paremad. Tulemuste põhjendamine on keeruline, kuna Agisoft Photoscan on suletud koodiga kommertstarkvara.

Kahe pildistamiskorra fotodest tehtud mudelite vigade omavaheline võrdlemine näitas, et muud asjaolud (valgusolud, taimestik, markeerimispunktide asukohad) mõjutavad mudelite täpsust oluliselt rohkem kui kaamera valik. Käesolevas töös hinnati mudelite täpsust vaid kontrollpunktide asukohtade vigade kaudu. Arheoloogia seisukohalt on oluline esemete ja konstruktsioonide kuju võimalikult täpne jäädvustamine, seetõttu võiks edaspidi võrrelda punktide asukohti tihedas punktipilves laserskanneerimisel saadud andmetega.

KASUTATUD ALLIKAD JA KIRJANDUS

- Agisoft Phtoscan... (2018): Agisoft PhotoScan User Manual: Professional Edition, Version 1.4.
http://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_4_en.pdf (15.05.2018).
- Agisoft (s a): Agisoft Phtotscan [veebileht]. <http://www.agisoft.com/> (15.05.2018).
- Alttoa, K.** (1999). Kärkna klooster. *Eesti arhitektuur*, 4. Üldtoimetaja Villem Raam. Tallinn, Valgus, 80–81.
- An, Z.** (2017). Accuracy Assessment of 3D Point Clouds Generated by Photogrammetry From Different Distances. Magistritöö. Open Access Master's Report, Michigan Technological University.
<http://digitalcommons.mtu.edu/etdr/404> (15.05.2018). 36 lk.
- Atkinson, K. B** (2001). Close Range Photogrammetry and Machine Vision. Whittles Publishing. 384 lk.
- Comparison of photogrammetry software. Wikipedia 2018
https://en.wikipedia.org/wiki/Comparison_of_photogrammetry_software (15.05.2018).
- De Reu, J., Plets, G., Verhoeven, G., De Smedt, P., Bats, M., Cherretté, B., De Maeyer, W., Deconynck, J., Herremans, D., Laloo, P., Van Meirvenne, M., De Clercq, W** (2013). Towards a Three-Dimensional Cost-Effective Registration of the Archaeological Heritage. *Journal of Archaeological Science* 40(2). Lk 1108–1121.
<https://doi.org/10.1016/j.jas.2012.08.040>
- El-Omari, S., Moselhi** (2008). Integrating 3D laser scanning and photogrammetry for progress measurement of construction work. *Automation in Construction*. Lk 1–9.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2008.05.006>
- Fugazza, D., Scaioni, M., Corti, M., D'Agata, C., Azzoni, R. S., Cernuschi, M., Smiraglia, C. ja Diolaiuti, G. A.:**(2018) Combination of UAV and terrestrial photogrammetry to assess rapid glacier evolution and map glacier hazards, *Natural Hazards and Earth System Sciences* 18. Lk 1055–1077.
<https://doi.org/10.5194/nhess-18-1055-2018>.
- Hasselblatt, A.** (1889). Dritte Archäologische Exkursion. – Sitzungsberichte der Gelehrten Estnischen Gesellschaft, 1888, 148–154.
- Haukaas, C.** (2014). New Opportunities in Digital Archaeology: The Use of Low-Cost Photogrammetry for 3DDocumentation of Archaeological Objects from Banks Island, NWT. Magistritöö. University of Western Ontario. Electronic Thesis and Dissertation Repository.

- <https://ir.lib.uwo.ca/etd/2117>
- Huul, K.** (2016). Drooni fotogramm-meetria rakendamine kõrgusmodelite ja ortofotode loomiseks Raadi karjääri näitel. Bakalaureusetöö. Tartu Ülikooli ökoloogia ja maateaduste instituut. 41 lk.
- Jeffrey, S.** (2003) Three Dimensional Modelling of Scottish Early Medieval Sculpted Stones. Doktoriväitekirj. Glasgow Ülikooli arheoloogiaosakond. 311 lk.
<http://archaeologydataservice.ac.uk/archiveDS/archiveDownload?t=arch-387-1/disseminatin/pdf/3demss.pdf> (15.05.2018)
- Kangur, M.** (2016). Fotokaameraga tehtud fotode põhjal loodud 3D mudeli kvaliteeti mõjutavad faktorid. Bakalaureusetöö. Eesti Maaülikooli metsandus- ja maaehitusinstituut. Tartu. 52 lk.
<https://dspace.emu.ee/xmlui/handle/10492/2631>
- Karara, H. M.** (1989). Non-Topographic Photogrammetry. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 1989. 445 lk.
- Kersten, T.P., Lindstaedt, M.** (2012). Image-Based Low-Cost Systems for Automatic 3D Recording and Modelling of Archaeological Finds and Objects. *Progress in Cultural Heritage Preservation*. (Toimetajad Ioannides, M. jt.) Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, lk 1–10.
https://doi.org/10.1007/978-3-642-34234-9_1
- Kivirüüt, A, Olli, M.** (2016). Archaeological research on Aakre Kivivare tarand-grave. *Archaeological Fieldwork in Estonia 2015*, lk 59–70.
- Kjellmann, E.** (2012). From 2D to 3D - A photogrammetric revolution in archaeology. Master's Thesis in Archaeology. Faculty of Humanities, Social Sciences and Education Department of Archaeology and Social Anthropology University of Tromsø. 102 lk.
Kultuurimälestiste riiklik register. <https://register.muinas.ee/> 15.05.2018
- Laksa, E.** (2014). Lähifotogramm-meetria arheoloogias. Igaüks saab hakkama. Proseminaritöö. Tartu Ülikooli ajaloo ja arheoloogia instituut. 43 lk.
- Laneman, M., Lang, V., Saage, R.** (2016). Burial site hidden in a clearance cairn at Alu, Raplamaa. *Archaeological Fieldwork in Estonia 2015*, lk 35–46.
- Lerma, J.L., Navarro, S., Cabrelles, M., Villaverde, V.** (2010). Terrestrial laser scanning and close range photogrammetry for 3D archaeological documentation: the Upper Palaeolithic Cave of Parpalló as a case study. *Journal of Archaeological Science* 37. Lk 499–507.
<https://doi.org/10.1016/j.jas.2009.10.011>
- Liba, N.** (2005). Fotogramm-meetria alused. Tartu. 303 lk.
- Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S., Boehm, J.** (2013). Close Range Photogrammetry. De Gruyter. Berlin/Boston. 684 lk.
- Maa-ameti kaardirakendus: <http://xgis.maaamet.ee/xGIS/XGis>

- Matthews, N. A.** (2008). Aerial and Close-Range Photogrammetric Technology: Providing Resource Documentation, Interpretation, and Preservation. *Technical Note 428*. U.S. Department of the Interior, Bureau of Land Management, National Operations Center, Denver, Colorado. 42 lk.
- McCarthy, J.** (2014). Multi-image photogrammetry as a practical tool for cultural heritage survey and community engagement. *Journal of Archaeological Science* 43, lk 175–185.
<https://doi.org/10.1016/j.jas.2014.01.010>
- Miles, J., Pitts, M., Pagi, H., Earl, G.** (2014). New applications of photogrammetry and reflectance transformation imaging to an Easter Island statue. *Antiquity* 88. Lk 596–605.
<https://doi.org/10.1017/S0003598X00101206>
- Niederheiser, R., Mokroš, M., Lange, J., Petschko, H., Prasicek, G., Elberink, S.O.** (2016). Deriving 3D Point Clouds from Terrestrial Photographs – Comparison of Different Sensors and Software. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLI-B5*, 685–692.
<https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B5-685-2016>
- Pagi, H., Kimber, A.** (2017). Tallinna lennujaama territooriumil paikneva lohukivi reg nr 2615 dokumenteerimine 15. veebruaril 2017. Aruanne kultuurimälestiste riiklikus registris.
https://register.muinas.ee/ftp/Arheoloogia/2615_TLL-lennujaam_lohukivi_3Daruanne.pdf
 (15.05.2018)
- Pix4D (*s a*) [veebileht]. https://cloud.pix4d.com/store/?=&solution=pro#solution_pro (15.05.2018).
- Randjärv, J.** (1997). Geodeesia I osa. Tartu. 399 lk.
- Remondino, F.; Barazzetti, L.; Nex, F.; Scaioni, M.; Sarazzi, D.** (2011). UAV photogrammetry for mapping and 3d modeling—current status and future perspectives. *Proceedings of the International Conference on Unmanned Aerial Vehicle in Geomatics (UAV-g)*, Zurich, Switzerland. 14–16 September 2011.
- Remondino F., Del Pizzo S., Kersten T.P., Troisi S.** (2012) Low-Cost and Open-Source Solutions for Automated Image Orientation – A Critical Overview. (Toimetajad Ioannides M. jt) *Progress in Cultural Heritage Preservation. EuroMed 2012. Lecture Notes in Computer Science, vol 7616*. Springer, Berlin, Heidelberg. Lk 40 – 54.
- Saage, R.** (2013). Käku sepikoda. Arheoloogia väljas ja sees. Magistritöö. Tartu Ülikooli ajaloo- ja arheoloogia instituut. Tartu. 65 lk.
- Saage, R., Peets, J., Tiidu, E., Maldre, L.** (2015). New research results from the smithy site of Käku in 2013–2014. *Archaeological Fieldwork in Estonia 2014*, lk 193–204.
- Saage, R., Wärmländer, S.** (2018) Metal residues in 5th c. BCE–13th c. CE Estonian tools for non-ferrous metal casting. *Journal of Archaeological Science: Reports, Volume 19*. Lk 35–51.

<https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2018.01.015>

Schöning, J., Heidemann, G., (2015). Evaluation of Multi-view 3D Reconstruction Software.

(Toimetajad Azzopardi, G., Petkov, N.) *Computer Analysis of Images and Patterns*. Springer International Publishing, Cham. Lk 450–461.

https://doi.org/10.1007/978-3-319-23117-4_39

Sepp, E., Oja, T., Kohv, M. (2016). UAV-ga kogutud andmete põhjal loodud ortofoto ja reljeefimudelid täpsus. *Kaugseire Eestis 2016. Artiklikogumik*. Lk 49–59.

http://keskkonnaagentuur.ee/failid/kaugseire_eestis_2016__artiklikogumik_1.pdf

Soto-Martín, O. (2013). 3D Reconstruction & Traditional Illustrations, a Non-invasive Resource for the Practice and Teaching of Conservation and Restoration of Cultural Heritage. *Procedia Computer Science* 25. Lk 247–250.

<https://doi.org/10.1016/j.procs.2013.11.030>

Trimble tahhümeetrid (2016). Brochure – Trimble S-Series Total Stations – Estonian –Screen.pdf.

Infobrošüür. <https://drive.google.com/file/d/0B06YCVIYEilgSEpNX3d0YkxGYkE/view>

(17.05.2018)

Tvauri, A. (1999). Aruanne arheoloogilistest uuringutest Kärkna kloostri kastelli kirdenurga ja Mikaeli kabeli portaali juures 1999. aastal. Tartu. – Käsikiri Muinsuskaitseameti arhiivis.

Tvauri, A., Bernotas, R., Läänelaid, A. (2017). Archaeological excavations at the courtyard of Lutsu Street 12, Tartu. *Archaeological Fieldwork in Estonia 2016*. Lk 147–154.

Westoby, M.J., Brasington, J., Glasser, N.F., Hambrey, M.J., Reynolds, J.M. (2012). ‘Structure-from-Motion’ photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology* 179, lk 300–314.

Wolf, P. R., Dewitt, B. A., Benjamin, Wilkinson, B. E. (2014). Terrestrial and Close-Range Photogrammetry, in: Elements of Photogrammetry with Applications in GIS, Fourth Edition. McGraw Hill Professional, Access Engineering. 675 lk.

LISAD

Lisa 1. Telefoniga pildistatud fotodest tehtud tihedate punktipilvede võrdlus



Visual SFM abil loodud tihe punktipilv telefoni kaameraga tehtud fotodest.



Pix4D abil loodud tihe punktipilv telefoni kaameraga tehtud fotodest.



Agisoft Photoscani abil loodud tihe punktipilv telefoni kaameraga tehtud fotodest.

Lisa 2. Kaamera Canon Ixus 185 pildistatud fotodest tehtud tihedate punktipilvede võrdlus



Visual SFM abil loodud tihe punktipilv kaamera Canon Ixus 185 tehtud fotodest.



Pix4D abil loodud tihe punktipilv kaamera Canon Ixus 185 tehtud fotodest.



Agisoft Photoscan abil loodud tihe punktipilv kaamera Canon Ixus 185 tehtud fotodest.

Lisa 3. Kaamera Canon EOS 600D pildistatud fotodest tehtud tihedate punktipilvede võrdlus



Visual SFM abil loodud tihe punktipilv kaamera Canon EOS 600D tehtud fotodest.



Pix4D abil loodud tihe punktipilv kaamera Canon EOS 600D tehtud fotodest.



Agisoft Photoscan abil loodud tihe punktipilv kaamera Canon EOS 600D tehtud fotodest.

Lisa 4. Kaamera Canon EOS 760D pildistatud fotodest tehtud tihedate punktipilvede võrdlus



Visual SFM abil loodud tihe punktipilv kaamera Canon EOS 760D tehtud fotodest.



Pix4D abil loodud punktipilv kaamera Canon EOS 760D tehtud fotodest.



Agisoft Photoscani abil loodud tihe punktipilv kaamera Canon EOS 760D tehtud fotodest.

Lisa 5. Tahhümeetriliselt mõõdistatud markeerimispunktide koordinaadid esimesel ja teisel pildistuskorral

27.04.2018 mõõdistatud markeerimispunktid. Koordinaatsüsteem L-Est97, kõrgus EH2000

Markeerimis-tähise nr	X-koordinaat (m)	Y-koordinaat (m)	Kõrgus H (m)
1	6483379.336	651847.226	36.351
2	6483379.398	651847.300	36.355
3	6483379.309	651847.315	36.305
4	6483379.220	651847.328	36.256
5	6483379.280	651847.403	36.263
6	6483379.989	651850.992	37.506
7	6483379.983	651851.088	37.500
8	6483379.972	651851.034	37.414
9	6483379.962	651850.980	37.327
10	6483379.953	651851.076	37.322
11	6483378.965	651857.325	36.350
12	6483378.961	651857.425	36.361
13	6483378.876	651857.369	36.323
14	6483378.790	651857.313	36.288
15	6483378.789	651857.415	36.295
16	6483380.154	651852.969	37.476
17	6483380.162	651853.066	37.478
18	6483380.081	651853.023	37.427
19	6483380.005	651852.981	37.375
20	6483380.007	651853.076	37.379

08.05.2018 mõõdistatud markeerimispunktid. Koordinaatsüsteem L-Est97, kõrgus EH2000

Punkti nr	X-koordinaat (m)	Y- koordinaat (m)	Kõrgus H (m)	Märkus
1	6483378.845	651846.409	36.383	markeerimistähis
2	6483378.891	651846.492	36.394	markeerimistähis
3	6483378.788	651846.500	36.366	markeerimistähis
4	6483378.693	651846.502	36.335	markeerimistähis
5	6483378.742	651846.583	36.348	markeerimistähis
6	6483380.141	651848.881	37.425	markeerimistähis
7	6483380.15	651848.977	37.423	markeerimistähis
8	6483380.077	651848.934	37.371	markeerimistähis
9	6483379.999	651848.893	37.316	markeerimistähis
10	6483380.005	651848.989	37.315	markeerimistähis
11	6483378.840	651851.969	36.251	markeerimistähis
12	6483378.834	651852.065	36.258	markeerimistähis
13	6483378.747	651852.008	36.244	markeerimistähis
14	6483378.662	651851.951	36.232	markeerimistähis
15	6483378.635	651852.043	36.245	markeerimistähis
16	6483378.820	651858.142	36.416	markeerimistähis
17	6483378.809	651858.251	36.414	markeerimistähis
18	6483378.738	651858.180	36.381	markeerimistähis
19	6483378.645	651858.081	36.352	markeerimistähis
20	6483378.643	651858.203	36.350	markeerimistähis
21	6483380.136	651853.021	37.592	markeerimistähis
22	6483380.114	651853.114	37.591	markeerimistähis
23	6483380.091	651853.058	37.508	markeerimistähis
24	6483380.067	651853.002	37.425	markeerimistähis
25	6483380.046	651853.096	37.424	markeerimistähis
26	6483380.083	651847.940	37.377	markeerimistähis
27	6483381.506	651849.537	38.216	markeerimistähis
28	6483381.193	651852.931	38.064	markeerimistähis
29	6483379.717	651855.060	37.294	markeerimistähis
30	6483379.684	651858.941	37.038	markeerimistähis

Lisa 6. Mudelite kontrollpunktide vigade arvutused

Vigade arvutamise valemid on toodud lk 33–34.

27.04.2018 Canon EOS 760 4 sidepunkti- ja 16 kontrollpunktiga mudeli vead

Markeerimispunkti nr	ΔX (mm)	ΔY (mm)	ΔH (mm)	Kokku (mm)
1	3.508	1.421	3.400	5.088
2	2.669	1.357	2.478	3.886
3	2.129	0.403	3.445	4.070
4	1.635	0.952	3.637	4.100
6	-0.017	-0.532	-2.010	2.080
8	-3.766	-1.098	-1.919	4.367
9	-1.279	-0.817	-1.591	2.199
11	2.170	2.042	-0.991	3.140
12	-1.421	-2.893	-0.655	3.289
13	2.004	2.692	0.196	3.362
14	6.195	7.807	-0.047	9.967
16	1.131	-2.538	-5.480	6.144
17	-0.218	-3.670	-5.631	6.725
18	0.504	-2.713	-4.362	5.161
19	-1.174	-2.566	-4.147	5.016
20	1.918	-1.775	-4.708	5.384
Keskmine ruutviga (mm)	2.477	2.793	3.304	
Keskmise ruutvea enda viga (mm)	0.444969	0.501677	0.593357	
Koguviga (mm)				4.985

27.04.2018 Canon EOS 600 4 sidepunkti- ja 16 kontrollpunktiga mudeli vead

Markeerimistähise nr	X (mm)	Y(mm)	H (mm)	Kokku (mm)
1	1.404	1.468	0.510	2.094
2	0.637	1.326	-0.382	1.520
3	0.318	0.699	0.696	1.037
4	-0.100	1.542	0.924	1.800
6	1.522	-0.555	-0.100	1.623
8	-1.943	-1.052	-0.067	2.211
9	-0.396	-0.874	0.129	0.968
11	0.930	1.375	-2.272	2.814
12	-2.818	-3.588	-1.765	4.892
13	1.196	2.004	-1.203	2.626
14	5.258	7.042	-1.257	8.878
16	1.669	-1.784	-3.508	4.275
17	0.424	-2.814	-3.677	4.649
18	2.196	-1.725	-2.876	4.009
19	-0.383	-1.745	-2.154	2.799
20	2.948	-0.914	-2.435	3.931
Keskmine ruutviga (mm)	1.988	2.440	1.900	
Keskmise ruutvea enda viga (mm)	0.357	0.438	0.341	
Mudeli koguviga (mm)				3.677

27.04.2018 Canon Ixus 185 4 sidepunkti- ja 16 kontrollpunktiga mudeli vead

Markeerimistähise nr	$\Delta X(\text{mm})$	$\Delta Y(\text{mm})$	$\Delta Z(\text{mm})$	Kokku
1	1.699	0.916	2.069	2.829
2	0.893	0.646	1.413	1.792
3	1.164	-0.123	2.224	2.514
4	0.841	0.560	1.863	2.119
6	-0.017	-0.156	-1.031	1.043
8	-2.596	-0.494	-1.153	2.883
9	-0.600	-0.336	-0.878	1.115
11	1.327	1.770	-0.510	2.270
12	-2.587	-3.264	0.150	4.168
13	1.818	1.942	0.344	2.682
14	5.499	7.067	-0.218	8.957
16	-1.090	-0.407	-2.308	2.584
17	-2.379	-1.495	-2.263	3.608
18	-0.359	-0.536	-2.045	2.144
19	-2.556	-0.680	-1.625	3.104
20	0.799	0.106	-1.667	1.851
Keskmine ruutviga (mm)	2.131	1.548	2.077	
Keskmise ruutvea enda viga (mm)	0.383	0.278	0.373	
Mudeli koguviga (mm)				3.354

27.04.2018 Sony Xperia Z1 4 sidepunkti- ja 16 kontrollpunktiga mudeli vead

Markeerimistähise nr	X (mm)	Y(mm)	H (mm)	Kokku (mm)
1	5.804	3.583	0.413	6.833
2	4.563	3.763	-0.519	5.938
3	2.826	1.873	1.521	3.716
4	4.534	0.685	1.409	4.797
6	2.551	-0.509	-1.660	3.086
8	-2.455	-1.487	-1.206	3.114
9	-0.919	-1.312	-0.830	1.804
11	2.719	1.274	-2.625	3.988
12	-1.430	-3.811	-2.251	4.651
13	2.374	2.164	-1.110	3.398
14	5.728	8.082	-0.449	9.916
16	0.810	-0.995	-4.418	4.601
17	-0.492	-2.115	-4.687	5.165
18	0.480	-1.119	-3.325	3.541
19	-1.842	-1.328	-2.224	3.178
20	1.201	-0.444	-2.552	2.856
Keskmine ruutviga (mm)	3.065	2.850	2.332	
Keskmise ruutvea enda viga (mm)	0.550	0.512	0.419	
Mudeli koguviga (mm)				4.791

08.05.2018 Canon EOS 760 D 7 sidepunkti- ja 16 kontrollpunktiga mudeli vead

Markeerimistähise nr	X (cm)	Y(cm)	H (cm)	Kokku (cm)
1	0.409	0.646	-0.841	1.136
2	0.447	0.626	-0.730	1.060
3	0.928	0.259	-0.845	1.282
4	0.644	0.431	-0.695	1.041
6	0.073	0.074	-0.343	0.359
8	-0.333	0.129	-0.368	0.513
11	-1.417	-0.627	1.180	1.948
12	-1.862	-0.753	1.368	2.430
13	-1.615	-0.708	1.344	2.218
14	-1.565	-0.664	1.281	2.128
16	0.732	1.321	-0.355	1.551
17	-0.667	-0.290	-0.241	0.767
19	1.910	2.904	-0.666	3.540
21	-0.369	-0.505	0.656	0.906
22	-0.374	-0.474	0.635	0.876
23	-0.423	-0.444	0.655	0.897
24	-0.382	-0.427	0.701	0.905
26	0.361	0.225	-0.839	0.940
29	-0.238	-0.265	0.704	0.789
Keskmine ruutviga (cm)	0.965	0.865	0.827	
Keskmise ruutvea enda viga (cm)	0.159	0.142	0.136	
Mudeli koguviga (cm)				1.538

08.05.2018 Canon EOS 600D 7 sidepunkti- ja 19 kontrollpunktiga mudeli vead

Markeerimistähise nr	X (cm)	Y(cm)	H (cm)	Kokku (cm)
1	-0.109	0.058	-0.087	0.151
2	-0.028	0.036	-0.023	0.051
3	0.458	-0.299	-0.175	0.574
4	0.117	-0.112	-0.044	0.168
6	0.126	0.046	-0.048	0.142
8	-0.254	0.118	-0.140	0.313
11	-0.978	-0.248	0.425	1.094
12	-1.423	-0.370	0.585	1.582
13	-1.163	-0.312	0.557	1.327
14	-1.148	-0.265	0.486	1.274
16	0.914	1.237	-0.185	1.549
17	-0.528	-0.404	-0.016	0.665
19	2.166	2.818	-0.544	3.596
21	-0.271	-0.178	0.088	0.336
22	-0.240	-0.151	0.053	0.288
23	-0.269	-0.127	0.066	0.304
24	-0.171	-0.102	0.112	0.228
26	0.199	-0.010	-0.186	0.273
29	-0.105	-0.048	0.102	0.155
Keskmine ruutviga (cm)	0.797	0.733	0.284	
Keskmise ruutvea enda viga (cm)	0.131	0.120	0.047	
Mudeli koguviga (cm)				1.119

08.05.2018 Canon Ixus 185 7 sidepunkti- ja 16 kontrollpunktiga mudeli vead

Markeerimistähise nr	X (cm)	Y(cm)	H (cm)	Kokku (cm)
1	0.141	0.169	0.243	0.328
2	0.215	0.135	0.290	0.385
3	0.752	-0.208	0.141	0.793
4	0.463	-0.020	0.245	0.524
6	-0.139	-0.031	-0.077	0.162
8	-0.524	0.009	-0.160	0.547
11	-0.930	-0.383	0.211	1.028
12	-1.346	-0.498	0.360	1.479
13	-1.079	-0.441	0.339	1.214
14	-0.979	-0.394	0.241	1.082
16	0.890	1.466	0.043	1.716
17	-0.557	-0.190	0.228	0.631
19	2.147	3.101	-0.264	3.781
21	-0.268	-0.201	-0.056	0.340
22	-0.265	-0.157	-0.084	0.320
23	-0.268	-0.150	-0.084	0.318
24	-0.191	-0.120	-0.040	0.229
26	-0.120	0.009	-0.103	0.159
29	-0.129	0.061	-0.035	0.147
Keskmine ruutviga (cm)	0.792	0.819	0.199	
Keskmise ruutvea enda viga (cm)	0.130	0.135	0.033	
Mudeli koguviga (cm)				1.157

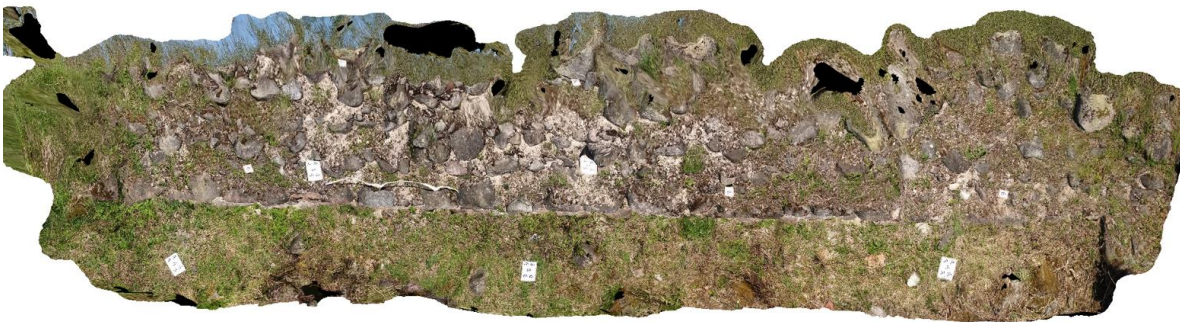
08.05.2018 Sony Xperia Z1 7 sidepunkti- ja 16 kontrollpunktiga mudeli vead

Markeerimistähise nr	X (cm)	Y(cm)	H (cm)	Kokku (cm)
1	0.447	0.136	-0.333	0.574
2	0.511	0.172	-0.242	0.591
3	0.842	-0.360	-0.387	0.994
4	0.447	-0.337	-0.274	0.623
6	-0.190	1.330	0.286	1.374
8	-0.615	1.273	0.173	1.424
11	-1.981	-0.541	-0.477	2.108
12	-2.623	-0.604	-0.278	2.706
13	-2.384	-0.638	-0.422	2.503
14	-2.223	-0.639	-0.645	2.401
16	0.388	1.872	-0.304	1.936
17	-1.177	0.141	-0.067	1.187
19	1.283	3.762	-0.673	4.032
21	-0.876	-0.662	0.515	1.213
22	-0.826	-0.634	0.469	1.142
23	-0.952	-0.543	0.456	1.187
24	-0.903	-0.476	0.464	1.121
26	1.165	1.698	-0.003	2.060
29	0.246	-0.079	-0.092	0.274
Keskmine ruutviga (cm)	1.277	1.194	0.389	
Keskmise ruutvea enda viga (cm)	0.210	0.196	0.064	
Mudeli koguviga (cm)				1.791

Lisa 7. Tekstuuriga 3D mudelite näiteid



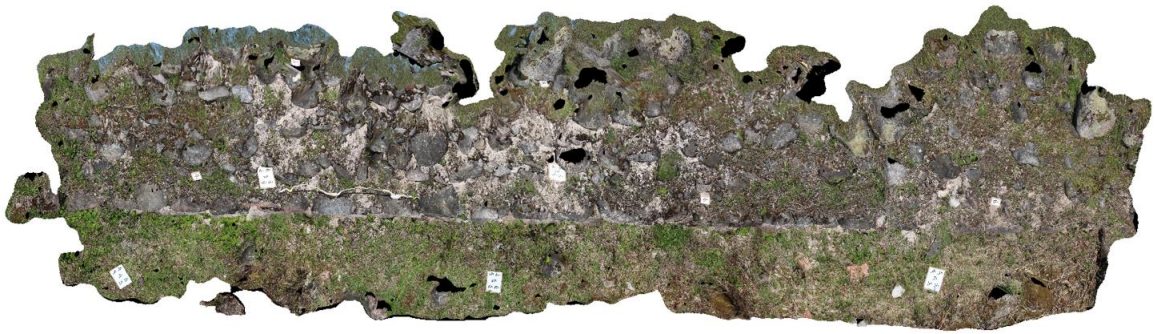
Telefoniga Sony Xperia Z1 08.05.2018 pildistatud fotodest tehtud mudel. Eestvaade.



Telefoniga Sony Xperia Z1 08.05.2018 pildistatud fotodest tehtud mudel. Pealvaade.



Kaameraga Canon EOS 760D 08.05.2018 pildistatud fotodest tehtud mudel. Eestvaade.



Kaameraga Canon EOS 760D 08.05.2018 pildistatud fotodest tehtud mudel. Pealtvaade.



Telefoniga Sony Xperia Z1 27.04. 2018 pildistatud fotodest tehtud mudel. Eestvaade.



Kaameraga Canon EOS 760D 27.04.2018 pildistatud fotodest tehtud mudel. Eestvaade.

Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Kärt Metsoja,
sünniaeg 22.01.1981,

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda koostatud lõputöö
“Fotokaamerate ja tarkvarade võrdlus lähifotogramm-meetriliste 3D mudelite loomisel”
mille juhendajad on Natalja Liba ja Ragnar Saage,
 - 1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,
 - 1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja
 - 1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;
3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor _____
(allkiri)

Tartu, 24.05.2018

Juhendajate kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

(juhendaja nimi ja allkiri)

(kuupäev)

(juhendaja nimi ja allkiri)

(kuupäev)